

EDA 应用技术

# Ansoft HFSS 入门教程与仿真实例

冯奎胜 李 娜 李 劲 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书作为初学者的入门教程,摒弃了其他相关书籍大量的基本理论知识介绍和原理叙述,针对 HFSS 软件初学者急需利用该软件进行实践应用的需要,从软件使用角度出发,以目前普遍应用的 HFSS 11.0 版本为平台,按照软件仿真设计的流程顺序,一步一步地由浅入深、从易到难介绍了 HFSS 软件的使用方法。

全书理论和工程实践紧密结合,体系完整,既适合 Ansoft HFSS 初学者入门学习,也适合从事电子通信、微波射频、天线技术领域的工程设计人员参考,还可用做高等院校相关专业的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

Ansoft HFSS 入门教程与仿真实例 / 冯奎胜, 李娜, 李劲编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.9  
(EDA 应用技术)

ISBN 978-7-121-21223-9

I. ①A… II. ①冯… ②李… ③李… III. ①电磁场—有限元分析—应用软件 IV. ①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 186004 号

策划编辑: 王敬栋 (wangjd@phei.com.cn)

责任编辑: 谭丽莎

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.5 字数: 636 千字

印 次: 2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



# 前 言

Ansoft HFSS 是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件。自 20 世纪 80 年代推出以来, HFSS 经过 20 多年的发展, 历经多次的版本更新和性能完善, 现已发展到 HFSS 13.0。如今, HFSS 以其无与伦比的仿真精度和可靠性、快捷的仿真速度、方便易用的用户界面、稳定成熟的自适应网格剖分技术, 已经成为微波射频领域工程师们进行天线、微波电路、电磁兼容等设计的首选工具。该软件可以分析、仿真任意三维无源结构的高频电磁场, 可直接得到特征阻抗、传播常数、 $S$  参数及电磁场、辐射场、散射场等结果, 被广泛用于无线和有线通信、计算机、卫星、雷达、半导体和微波集成电路、航空航天等领域。

本书作为初学者的入门教程, 摒弃了其他相关书籍大量的基本理论知识介绍和原理叙述, 针对 HFSS 软件初学者急需利用该软件进行实践应用的需要, 从软件使用角度出发, 以目前普遍应用的 HFSS 11.0 版本为平台, 按照软件仿真设计的流程顺序, 一步一步地由浅入深、从易到难介绍了 HFSS 软件的使用方法。本书的各章节相对独立又前后联系。编者在介绍软件的基本使用方法的同时, 根据自己多年的仿真设计经验, 及时给出了总结和关键提示, 以帮助读者快速、正确、灵活地使用该软件。

本书共分为两大部分, 第一部分为软件入门篇, 结合简单的具体实例, 重点介绍了 HFSS 软件的各种基本操作方法和技巧。这部分共分为 6 章, 分别介绍了 HFSS 软件的相关概念、仿真模型的创建、仿真的相关设置、仿真数据后处理、优化设计等方面的基本操作和方法, 并给出了两个入门实例, 以帮助读者将各部分基本理论串接起来, 巩固和熟悉 HFSS 软件的基本功能和应用, 在实践中体会软件各部分的操作, 建立起完整的仿真设计思路, 巩固基本理论知识的学习。第二部分为实例篇, 根据工程设计需要, 为读者提供了大量的仿真设计实例, 这些实例涵盖了软件应用的各个领域, 既有基本的设计实例, 可以帮助读者进一步熟悉和掌握软件的应用技巧; 又有具体的工程设计实例, 为不同领域的工程设计人员提供了具体的解决案例。

编著者根据读者学习和工程应用的需要编写此书, 希望能够为广大读者的学习起到良好的引导作用, 为广大读者自学提供一个简捷、有效的途径。限于时间和编著者的水平, 书中难免存在疏漏和不足, 恳请广大读者批评指正。

最后, 谨以此书献给我的宝贝女儿, 希望她健康快乐地成长!

冯奎胜  
2013 年 8 月



# 软件词汇含义中英文对照表

Adaptive Meshing	自适应网格
Add Sweep	添加扫频设置
Analysis	分析计算
Arbitrary Wave Source	任意波源激励
Assign boundary	指定边界条件
Attribute	属性
Axial ratio	轴比
Boolean	布尔
Boundaries	边界条件
Command	命令
Connect	连接
Coordinate Systems	坐标系统
Create report results	创建图表结果
Cylinder	圆柱
HFSS Design	HFSS 设计
Draw a geometric model	创建模型
Driven Terminal	终端驱动
Duplicate	复制
Eigenmode	本征模
Excitations	激励源
Feed line	馈线
Field Overlays	场分布
Finite Conductivity	有限电导率边界
Global	全局坐标系统
Impedance	阻抗边界
Infinite Ground Plane	无限大地平面
Integration Line	集成线路
Intersect	交叉
Layered Impedance	分层阻抗边界
Lump Port	集总端口激励
Lumped RLC	集总 RLC 边界
Master/Slave	主/从边界



Maximum Number of Passes	收敛迭代最大步数
Menu bar	菜单栏
Mesh Operation	网格操作
Message Manage	信息管理
Model	物体模型
Natural	自然边界
Offset origin	原点偏移
Operational Guideline and Application	操作指南和应用
Optimization	参数优化
Parametric sweep and optimization	参数扫描与变量优化
Parametric	参数扫描分析
PEC ( Perfect Electric Conductor )	理想的电导体材料
Perfect E	理想导体边界
Perfect H	理想磁边界
Port Field Display	端口场分布
Progress window	进程窗口
Project	工程
Project Manager	工程管理
Properties window	属性窗口
Radiation	设置近场、远场辐射球面及天线阵
Rectangle	矩形
Results	后处理结果
Rotate axis	旋转轴
Section	切割
Sensitivity	参数敏感性
Solution Type	求解类型
Split	分裂
Statistical	统计
Status bar	状态栏
Subtract	相减
Sweep	扫描
Symmetry	对称边界
Toolbars	工具栏
Unite	合并
Vacuum	真空
Variables	变量
Validation Check	设计有效性验证

# 目 录

## 第一部分 软件入门篇

<b>第1章</b>	<b>Ansoft HFSS 概述及入门实例</b>	<b>1</b>
1.1	HFSS 简介	1
1.1.1	HFSS 的功能介绍	1
1.1.2	HFSS 的计算原理	2
1.1.3	HFSS 的设计流程	4
1.1.4	HFSS 的文件管理	5
1.1.5	HFSS 的启动	7
1.2	入门实例一：T 形波导的内场分析	9
1.2.1	创建并保存新工程	9
1.2.2	创建 T 形波导模型	12
1.2.3	添加仿真的基本设置	18
1.2.4	仿真有效性验证及分析	20
1.2.5	查看 T 形波导的内场分布	20
1.2.6	保存并退出 HFSS	24
1.3	入门实例二：对称偶极子天线远场分析	25
1.3.1	创建并保存新工程	25
1.3.2	创建偶极子天线模型	28
1.3.3	添加仿真的基本设置	36
1.3.4	仿真有效性验证与分析	39
1.3.5	查看天线远场辐射方向图	39
1.3.6	保存并退出 HFSS	43
<b>第2章</b>	<b>HFSS 操作界面</b>	<b>44</b>
2.1	标题栏	44
2.2	主菜单栏	45
2.3	工具栏	56
2.4	工程管理窗口	58
2.5	属性窗口	58
2.6	信息管理窗口	59
2.7	进程窗口	59



2.8	模型管理窗口 .....	59
2.9	状态栏 .....	61

### 第3章 HFSS 仿真建模的基本操作 .....

63

3.1	坐标系与工作平面 .....	63
3.1.1	全局坐标系 .....	63
3.1.2	相对坐标系 .....	64
3.1.3	面坐标系 .....	65
3.1.4	工作平面 .....	65
3.2	HFSS 中的变量 .....	66
3.2.1	变量类型 .....	66
3.2.2	工程变量的添加、删除和使用 .....	68
3.2.3	设计变量的添加、删除和使用 .....	70
3.3	鼠标的移动与捕捉 .....	71
3.3.1	鼠标的移动模式 .....	71
3.3.2	鼠标的捕捉模式 .....	71
3.4	模型的属性 .....	72
3.4.1	模型管理树 .....	72
3.4.2	模型属性 .....	74
3.5	二维基本模型的创建 .....	75
3.5.1	二维线段的绘制 .....	75
3.5.2	二维平面的绘制 .....	80
3.6	三维基本模型的创建 .....	81
3.6.1	创建长方体模型 .....	82
3.6.2	创建其他三维基本模型 .....	83
3.6.3	创建螺旋体模型 .....	84
3.7	非基本模型的创建 .....	87
3.7.1	由线生面 .....	87
3.7.2	由面生体 .....	90
3.7.3	扭波导的创建 .....	91
3.8	模型的选择 .....	93
3.8.1	选择类型与模式 .....	93
3.8.2	物体模型的选择方法 .....	94
3.9	模型的调整 .....	95
3.9.1	几何变换 .....	95
3.9.2	边缘切削 .....	98
3.9.3	布尔运算 .....	100
3.10	模型的显示 .....	103
3.10.1	模型的查看与浏览 .....	103





3.10.2 改变视图和视角	103
3.10.3 物体模型的显示与隐藏	105

## 第4章 HFSS 仿真的基本设置 107

4.1 边界条件的设置	107
4.1.1 边界条件概述	107
4.1.2 理想导体边界	108
4.1.3 理想磁边界	108
4.1.4 有限导体边界	109
4.1.5 阻抗边界	110
4.1.6 分层阻抗边界	110
4.1.7 辐射边界	111
4.1.8 对称边界及阻抗倍乘器的使用	111
4.1.9 主、从边界	114
4.1.10 集总 RLC 边界	114
4.1.11 理想匹配层边界	114
4.1.12 无限地平面	115
4.2 激励类型与设置	115
4.2.1 波端口激励	116
4.2.2 集总端口激励	121
4.2.3 Floquet 端口激励	121
4.2.4 入射波激励	122
4.2.5 电压源激励	123
4.2.6 电流源激励	123
4.2.7 磁偏置源激励	123
4.3 材料属性的设置	124
4.3.1 设置物体模型的材料属性	124
4.3.2 材料属性说明	125
4.4 网格剖分的设置	126
4.4.1 自适应网格剖分	126
4.4.2 手动设置网格	130
4.4.3 表面近似设置	131
4.4.4 网格使用建议	133
4.5 分析求解的设置	133
4.5.1 求解类型	133
4.5.2 不同求解类型的比较	135
4.5.3 求解器的设置	136
4.5.4 扫频求解	142



4.5.5 仿真有效性验证与分析	146
4.5.6 自适应迭代求解	149

## 第5章 仿真数据的后处理

5.1 后处理的方法及步骤	152
5.1.1 后处理操作命令	152
5.1.2 数据的显示方式	153
5.2 查看求解信息	153
5.2.1 求解信息	153
5.2.2 等效电路输出	155
5.3 查看数值结果	156
5.3.1 数值结果类型	156
5.3.2 自定义输出变量	157
5.4 查看场分布	159
5.4.1 场量类型	159
5.4.2 场图绘制	160
5.4.3 动态显示	162
5.5 场计算器的使用	163
5.5.1 功能介绍	163
5.5.2 图形报告	170
5.5.3 注意事项	171
5.6 辐射和散射问题的处理	171
5.6.1 HFSS 辐射问题的计算	171
5.6.2 天线远场方向图的绘制	172
5.6.3 天线参数的计算与查看	178
5.6.4 天线阵列的处理	181
5.6.5 HFSS 散射问题的计算	185

## 第6章 HFSS 优化设计

6.1 基本概念及功能介绍	187
6.1.1 优化变量	187
6.1.2 参数扫描分析	188
6.1.3 参数优化设计	189
6.1.4 调谐分析	192
6.1.5 敏感性分析	192
6.1.6 统计分析	192
6.2 HFSS 优化设计实例	193
6.2.1 添加输出变量	193







6.2.2 参数扫描分析 .....	196
6.2.3 优化设计 .....	197
6.3 HFSS 优化设计的注意事项 .....	201

## 第二部分 实 例 篇

<b>第7章 八木-宇田天线仿真实例 .....</b>	<b>203</b>
7.1 八木-宇田天线概述 .....	203
7.2 八木-宇田天线的原理分析 .....	204
7.3 HFSS 仿真设计概述 .....	204
7.4 创建工程设计 .....	205
7.4.1 新建工程设计并保存 .....	205
7.4.2 设置求解类型 .....	206
7.4.3 设置模型尺寸单位 .....	206
7.4.4 建模的相关选项设置 .....	207
7.5 创建八木天线的仿真模型 .....	207
7.5.1 定义设计变量 .....	207
7.5.2 设置模型的默认材料 .....	209
7.5.3 创建有源对称振子 .....	210
7.5.4 创建反射器模型 .....	212
7.5.5 创建引向器模型 .....	212
7.6 设置激励及边界条件 .....	214
7.6.1 设置集总端口激励 .....	214
7.6.2 设置辐射边界条件 .....	217
7.7 仿真的基本设置 .....	219
7.7.1 求解设置 .....	219
7.7.2 扫频设置 .....	220
7.7.3 仿真有效性验证及分析计算 .....	221
7.8 查看仿真分析结果 .....	222
7.8.1 查看计算收敛情况 .....	222
7.8.2 查看天线的频带特性 .....	223
7.9 优化设计 .....	225
7.9.1 参数扫描分析 .....	225
7.9.2 优化设计 .....	229
7.10 应用并查看优化后的天线指标 .....	231
7.10.1 天线的 $S_{11}$ 参数 .....	231
7.10.2 天线的三维增益方向图 .....	232
7.10.3 天线的二维增益方向图 .....	234



7.10.4 天线参数列表 .....	235
---------------------	-----

## 第8章

微波混合接头仿真实例 .....	237
8.1 魔 T 的结构形式及特性 .....	237
8.2 HFSS 仿真设计概述 .....	238
8.3 创建工程设计 .....	239
8.3.1 新建工程设计并保存 .....	239
8.3.2 设置求解类型 .....	240
8.3.3 设置模型尺寸单位 .....	240
8.3.4 建模的相关选项设置 .....	240
8.4 创建魔 T 的仿真模型 .....	242
8.4.1 定义设计变量 .....	242
8.4.2 创建魔 T 波导臂 .....	243
8.4.3 创建匹配锥体模型 .....	246
8.5 仿真的基本设置 .....	249
8.5.1 求解设置 .....	249
8.5.2 扫频设置 .....	250
8.5.3 仿真有效性验证及分析计算 .....	251
8.6 查看仿真分析结果 .....	252
8.6.1 计算收敛情况 .....	252
8.6.2 魔 T 的匹配特性 .....	253
8.6.3 魔 T 的隔离特性 .....	254
8.6.4 魔 T 的平分特性 .....	255
8.6.5 魔 T 的场分布图 .....	256

## 第9章

微带天线仿真实例 .....	258
9.1 微带天线概述 .....	258
9.1.1 微带天线的优缺点 .....	258
9.1.2 微带天线的辐射原理 .....	259
9.2 矩形微带天线设计实例 .....	260
9.2.1 矩形微带天线的设计步骤 .....	261
9.2.2 创建工程设计 .....	262
9.2.3 创建矩形微带天线的仿真模型 .....	264
9.2.4 设置激励及边界条件 .....	270
9.2.5 仿真的基本设置 .....	273
9.2.6 查看仿真分析结果 .....	276
9.3 圆形微带天线设计实例 .....	281
9.3.1 圆形微带天线的理论分析 .....	281





9.3.2	HFSS 仿真设计概述	284
9.3.3	创建工程设计	285
9.3.4	创建圆形微带天线的仿真模型	287
9.3.5	设置激励及边界条件	292
9.3.6	仿真的基本设置	295
9.3.7	查看仿真分析结果	297
9.3.8	优化设计	299
9.3.9	应用并查看优化后的天线指标	305
<b>第10章</b>	<b>频率选择表面 (FSS) 仿真实例</b>	<b>310</b>
10.1	频率选择表面概述	310
10.1.1	什么是 FSS	310
10.1.2	周期单元对 FSS 的影响	311
10.1.3	介质加载对 FSS 的影响	311
10.2	环形单元 FSS 的原理分析	311
10.3	HFSS 仿真设计概述	312
10.4	创建工程设计	313
10.4.1	新建工程设计并保存	313
10.4.2	设置求解类型	314
10.4.3	设置模型尺寸单位	314
10.4.4	建模的相关选项设置	315
10.5	创建 FSS 仿真模型	315
10.5.1	定义设计变量	315
10.5.2	创建环形单元模型	316
10.5.3	创建介质衬底	318
10.5.4	创建空气腔	320
10.6	设置激励及边界条件	321
10.6.1	设置 Floquet 端口激励	321
10.6.2	设置主、从边界条件	323
10.6.3	设置理想导体边界条件	325
10.7	仿真的基本设置	326
10.7.1	求解设置	326
10.7.2	扫频设置	327
10.7.3	仿真有效性验证及分析计算	328
10.8	查看仿真分析结果	329
10.8.1	查看计算收敛情况	329
10.8.2	查看 FSS 频率选择特性	330



<b>第11章</b>	<b>阶梯型方波导圆极化器仿真实例</b>	332
11.1	波导圆极化器概述	332
11.2	方波导圆极化器的原理分析	333
11.3	HFSS 仿真设计概述	334
11.4	创建工程设计	335
11.4.1	新建工程设计并保存	335
11.4.2	设置求解类型	336
11.4.3	设置模型尺寸单位	336
11.4.4	建模的相关选项设置	337
11.5	创建圆极化器的仿真模型	337
11.5.1	定义设计变量	337
11.5.2	创建阶梯型金属膜片	339
11.5.3	创建方波导模型	342
11.6	设置输入、输出激励	343
11.6.1	绘制端口激励平面	343
11.6.2	设置输入端口激励	343
11.6.3	设置输出端口激励	344
11.7	仿真的基本设置	345
11.7.1	求解设置	345
11.7.2	扫频设置	346
11.7.3	定义输出变量	346
11.7.4	仿真有效性验证及分析计算	348
11.8	查看仿真分析结果	349
11.8.1	查看计算收敛情况	349
11.8.2	查看圆极化特性	350
<b>第12章</b>	<b>Wilkinson 功分器仿真实例</b>	353
12.1	Wilkinson 功分器的原理分析	353
12.2	HFSS 仿真设计概述	355
12.3	创建工程设计	356
12.3.1	新建工程设计并保存	356
12.3.2	设置求解类型	356
12.3.3	设置模型尺寸单位	356
12.3.4	建模的相关选项设置	357
12.4	创建功分器仿真模型	357
12.4.1	创建微带线模型	357
12.4.2	创建微带线的切角模型	359



12.4.3	合并模型及镜像复制	359
12.4.4	创建介质基板	360
12.4.5	参考地平面	361
12.5	设置激励及边界条件	362
12.5.1	设置集总端口激励	362
12.5.2	设置集总 RLC 边界	365
12.5.3	设置辐射边界条件	366
12.6	仿真的基本设置	367
12.6.1	求解设置	367
12.6.2	扫频设置	368
12.6.3	仿真有效性验证及分析计算	369
12.7	查看仿真分析结果	370
12.7.1	计算收敛情况	370
12.7.2	功分器的匹配特性	371
12.7.3	功分器的隔离特性	372
12.7.4	两输出端口的幅度及相位关系	373
<b>第13章</b>	<b>RCS 仿真实例</b>	<b>375</b>
13.1	雷达散射截面 (RCS) 概述	375
13.1.1	RCS 定义	375
13.1.2	RCS 的单位	376
13.1.3	RCS 的特性	376
13.2	HFSS 仿真概述	377
13.3	创建工程设计	378
13.3.1	新建工程设计并保存	378
13.3.2	设置求解类型	378
13.3.3	设置模型尺寸单位	379
13.3.4	建模的相关选项设置	379
13.4	创建 RCS 的仿真模型	380
13.4.1	创建理想金属球	380
13.4.2	创建辐射空气腔	381
13.5	设置激励及边界条件	382
13.5.1	设置平面波激励	382
13.5.2	设置辐射边界条件	383
13.5.3	设置对称边界条件	384
13.6	仿真的基本设置	385
13.6.1	求解设置	385
13.6.2	扫频设置	386



13.6.3	仿真有效性验证及分析计算 .....	387
13.7	查看仿真分析结果 .....	388
13.7.1	理想金属球的单站 RCS .....	388
13.7.2	理想金属球的双站 RCS .....	390
附录 A	HFSS 的常用快捷键 .....	391

# 第一部分 软件入门篇

## 第1章 Ansoft HFSS 概述及入门实例

对于用户来说，无论选择哪种仿真软件，首先最想了解的就是软件的应用范围和能够实现哪些功能，以及是否可以满足自己的实际需要。因此，本章首先对 Ansoft HFSS 软件进行概述。本章包括以下内容：

- (1) HFSS 的应用领域；
- (2) HFSS 的基本功能；
- (3) HFSS 的仿真设计流程；
- (4) HFSS 的求解原理；
- (5) HFSS 的启动和界面；
- (6) HFSS 的入门实例。

通过本章的学习，目的是使读者从整体上对 HFSS 软件有一个初步的了解，为下一步的仿真学习打好基础。

### 1.1 HFSS 简介

HFSS 是高频结构仿真器（High Frequency Structure Simulator）的缩写。Ansoft HFSS 是美国 Ansoft 公司开发的一款三维电磁场仿真软件。它基于 Windows 图形用户界面进行任意无源三维器件的全波电磁场仿真，易于学习，有立体建模、可视化、仿真分析、自动优化等功能，使得三维电磁设计问题能快速而准确地得到解决。

HFSS 应用切向矢量有限元法，可求解任意三维射频、微波器件的电磁场分布，计算由材料和辐射带来的损耗；其仿真分析可直接得到特征阻抗、传播系数、 $S$  参数及电磁场分布、天线方向图、特定吸收率等参数。HFSS 广泛应用于微波、通信、射电天文、生物电磁学、环保科学等领域。

#### 1.1.1 HFSS 的功能介绍

Ansoft HFSS 采用自适应网格剖分、ALPS 快速扫频、切向元等专利技术，集成了工业标准的建模系统，提供了功能强大、使用灵活的宏语言，直观的后处理器及独有的场计算器，可计算、分析、显示各种复杂的电磁场，并可利用 Optimetrics 对任意的参数进行优化



和扫描分析。使用 HFSS 计算可以得到以下相关信息：

- (1) 基本电磁场数值解和开边界问题，近、远场辐射问题；
- (2) 端口特征阻抗和传输常数；
- (3)  $S$  参数和相应端口阻抗的归一化  $S$  参数；
- (4) 结构的本征模或谐振解。

HFSS 的应用领域涵盖了微波，各种形式的天线和天线阵列，以及信号完整性/高速数字电路分析等领域，下面分别进行介绍。

### 1. 微波领域

HFSS 能够快速、精确地计算各种射频/微波无源器件的电磁特性，得到  $S$  参数、传播常数、电磁特性，优化器件的性能指标，并进行容差分析，使工程设计人员能够方便、快捷地得到各类微波器件的准确的电磁特性。其适用范围包括以下几方面。

- (1) 滤波器：腔体滤波器、微带滤波器、介质滤波器。
- (2) EMC/EMI：屏蔽罩、近场—远场辐射。
- (3) 连接器：同轴连接器、SFP/XFP、底板、过渡。
- (4) 波导：波导滤波器、波导谐振器、波导过渡器、波导连接器。

### 2. 天线领域

HFSS 可以为天线和天线阵列提供全面的仿真分析和优化设计，精确计算天线的各种参数指标，包括二维、三维远场和近场辐射方向图、方向性系数、天线增益、轴比、半功率波瓣宽度，以及内部电磁场分布、天线阻抗、电压驻波比、 $S$  参数等。其适用范围包括以下几方面。

- (1) 面天线：贴片天线、偶极子天线、喇叭天线、手机天线、螺旋天线。
- (2) 波导：圆形/矩形波导、喇叭。
- (3) 线天线：偶极子天线、螺旋线天线。
- (4) 天线阵列：有限天线阵列、频率选择表面 (FSS)、光子带隙 (PBG)。
- (5) 雷达反射截面 (RCS)。

### 3. 信号完整性/高速数字电路分析

HFSS 能够自动、精确地提取高速互连结构和版图寄生效应，导出 SPICE 参数模型和 Touchstone 文件，并以 snp 格式保存，结合 Ansoft Designer 或其他电路仿真分析工具来仿真瞬态现象。其适用范围包括以下几方面。

- (1) Package Modeling – BGA, QFP, Flip-Chip。
- (2) PCB：功率/接地面、网格接地，底板。
- (3) Connectors – SFP/XFP, VHDM, GBX, 同轴。
- (4) 连接器：微分/Single-ended Vias。

#### 1.1.2 HFSS 的计算原理

HFSS 是利用有限元方法的三维频域电磁场计算软件，它对求解的微波问题以四面体为单元进行网格剖分，通过对各个剖分单元电场分量的计算来获得各个微波物理量和特性参





数。有关有限元方法的背景和基本原理,本书不再进行详细的介绍,感兴趣的读者可以参考相关书籍,这并不影响软件使用者对软件的学习和操作。

一旦问题被正确地设定, HFSS 将自动完成全部或一次跨过几个步骤的求解过程。由有限元的求解原理可知,有限元的求解时间与求解精度是一对矛盾,这是因为求解矩阵的复杂度与问题空间的网格剖分密度有着密切的关系,网格剖分得越细,求解矩阵的未知数数目也就越多,求解所需的时间也就越长。但同时,有限元方法的求解精度也会随着未知数的增加而更加准确。为了获得两者之间的平衡, HFSS 采用了自适应迭代算法进行求解,如图 1-1 所示。

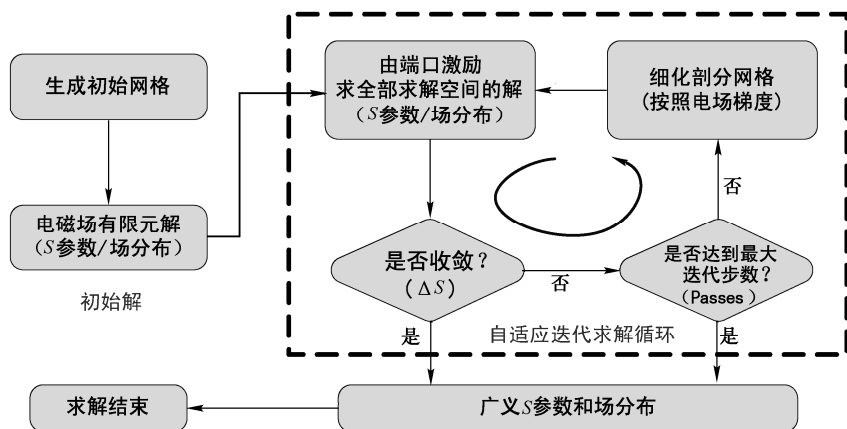


图 1-1 HFSS 自适应迭代的求解原理

从图 1-1 中可以看到,该算法一开始先在较粗的网格剖分基础上进行求解,然后检验收敛性是否满足要求,如果不满足,则进一步细化剖分网格,再次求解并再次检验收敛性,如此迭代下去,直到达到需要的收敛精度为止。

自适应分析的一般步骤如下:

- (1) HFSS 生成初始网格;
- (2) 在求解频率激励下, HFSS 利用初始网格计算结构内部的电磁场(如果需要进行扫频分析,则自适应求解仅对设置的求解频点进行);
- (3) 基于当前有限元的解, HFSS 估算与精确解有较大误差的求解区域,并细化对应区域的网格;
- (4) 利用细化的网格得出新的解;
- (5) 重新计算误差,重复迭代过程,直到满足收敛标准或达到设置的最大迭代步数为止;
- (6) 在此网格的基础上进行扫频分析,不再进一步细化网格。

HFSS 软件对于微波工程的求解问题可以分为以下两类求解问题。

第一类为确定性问题的求解,也称为激励求解问题。其求解过程是将所要求解的微波问题等效为计算  $N$  端口网络的  $S$  矩阵问题,其具体步骤如下:

- (1) 将结构划分为有限元网格(自适应网格剖分);
- (2) 在每一个激励端口处计算与端口具有相同截面的传输线所支持的模式;
- (3) 假设每次激励一个模式,计算结构内的全部电磁场模式;

(4) 由得到的反射量和传输量计算广义  $S$  矩阵。

$S$  矩阵的结果使得传输信号和反射信号的幅度可以直接由给定的一组输入信号求得，这就使得结构的全部三维电场、磁场特性成为一组高频电路参数。

激励求解问题又因计算  $S$  参数的参数不同分为激励求解和激励终端求解。

**激励求解：**用 HFSS 计算无源、高频结构的  $S$  参数时，可选择“Driven Modal”求解类型，如微带、波导和传输线结构。 $S$  参数用一系列波导模的入射和反射功率来表示。它主要用来分析微带、波导、传输线结构的单终端微波传输问题，以及由这些结构激励的天线辐射问题。

**激励终端求解：**用 HFSS 计算多导体传输线端口的  $S$  参数时，可以选择“Driven Terminal”求解类型。 $S$  参数的解将用一系列终端电压和电流来表示。

第二类为本征值求解问题，用来计算微波结构的谐振频率及在这些谐振频率处的对应场，也可以计算谐振腔体的无载  $Q$  值。本征模问题求解中不包含端口和激励源，得到的  $Q$  值不包含由源引起的损耗。

各种不同求解类型的特点、使用范围及区别将在之后的求解设置章节中详细介绍。

### 1.1.3 HFSS 的设计流程

Ansoft HFSS 提供了一个直观、易于操作的建立任意三维模型的界面。使用 HFSS 进行仿真优化设计的简要流程如图 1-2 所示。

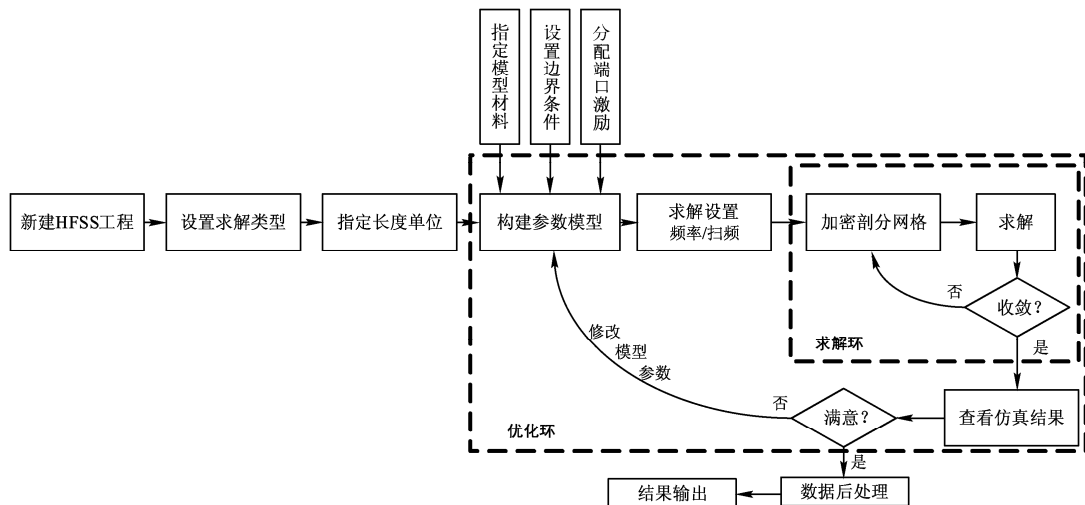


图 1-2 使用 HFSS 进行仿真优化设计的简要流程

由图 1-2 可知，实现一个仿真优化设计主要包括以下几个步骤。

(1) 启动 HFSS 软件，新建一个设计工程。

(2) 设置求解类型。HFSS 有三种求解类型，第一种是模式驱动（Driven Modal）；第二种是终端驱动（Driven Terminal）；第三种是本征模（Eigenmode）。关于求解类型的区别和选择，将在后续章节中介绍。



- (3) 创建互连参数的结构模型。HFSS 拥有强大的全参数三维模型创建功能。在简单的实体建模中，直接使用 HFSS 中提供的基本图形即可；当创建复杂的物体时，可以用布尔运算等操作完成。
- (4) 设置基本参数。三维模型创建完成后，需要指定模型材料，设置边界条件及分配激励端口，为下一步有限元的分析处理做好准备。
- (5) 设置求解。既可以进行自适应频率和收敛标准的设置，也可以进行互连结构的扫频响应设置。
- (6) 运行仿真计算。仿真计算的过程是自动的。HFSS 会根据用户提供的模型及设置的各种参数信息，自动完成模型的网格剖分和分析计算等操作。
- (7) 优化设计。针对计算结果，用户既可以设置优化目标进行自动优化设计，也可以手动调整模型的结构参数进行多次计算，直到得出满意的仿真结果为止。
- (8) 数据处理。HFSS 具有功能强大又很灵活的数据管理和绘图能力，可以计算、显示各种图表结果，还可以将 S/Y/Z 矩阵参数等输出成适合用 Matlab 编程，后缀为.m 的文件。

1.1.4 HFSS 的文件管理

1. 常见的 HFSS 文件及文件夹形式（表 1-1）

表 1-1 常见的 HFSS 文件及文件夹形式

文件 格 式	文 件 说 明
*.HFSS	默认的 HFSS 存盘文件，包含除计算结果以外的所有与工程相关的内容
Project_name.HFSSresults	文件夹，保存工程结果数据
Design_name.HFSSresults	文件夹，保存具体设计的结果数据，保存在所在的工程结果文件夹（Project_name.HFSSresults）中
Project_name.HFSS.auto	工程自动保存文件
Project_name.HFSS.lock	工程锁定文件，当工程打开后，不支持再次打开
*.pjt	HFSS 软件早期 8.5 以前版本的工程文件
*.anfp	Ansoft 的 PCB 中性文件

2. 导出文件

由主菜单栏的“Modeler→Export”命令可以导出工程中与模型相关的各种文件，其中与模型相关的文件类型如表 1-2 所示。

表 1-2 HFSS 模型文件

文件 格 式	文 件 说 明
*.sm2	Ansoft 三维模型文件
*.sat	ACIS 几何实体模型文件
*.sm3	ACIS 2.0 版本以上的 HFSS 三维模型文件
*.iges、*.igs	IGES 标准文件
*.dxf	AutoCAD 的 DXF 文件
*.step、*.stp	AP203 工业标准的 STEP 模型文件
*.gds	GDSII 文件

HFSS 图表文件如表 1-3 所示。



表 1-3 HFSS 图表文件

文件 格 式	文 件 说 明
*.bmp	位图文件
*.gif	交互格式图形文件
*.jpeg	联合图像专家组文件
*.tiff	标记图像文件
*.wrl	VRML 场景模型文件

分析出结果后，可以由主菜单栏的“Report2D→Export”命令导出数据结果文件，如表 1-4 所示。

表 1-4 HFSS 数据结果文件

文 件 格 式	文 件 说 明
*.txt	后处理数据文本文件
*.csv	逗号分隔值文件
*.tab	Tab 键分隔值文件
*.dat	Ansoft 图表数据文件

### 3. 导出矩阵数据

在工程树的“Analysis”节点的“setupn”上单击鼠标右键，选择“Matrix Data”，会弹出“Solution Data”对话框，还可以在工程树的“Results”上单击鼠标右键，直接选择“Solution Data”，调出对话框。选择想查看的参数类型，包括 S-matrix, Z-matrix, Gamma, Z0 等，选择“Export Matrix Data”命令导出对应参数的矩阵数据。导出的文件格式如表 1-5 所示。

表 1-5 HFSS 矩阵数据文件

文 件 格 式	文 件 说 明
*.tab	数据列表文件，将 S 矩阵的各项按照顺序列出，包括数据头，以 Tab 键隔开
*.sNp	N 个端口的 S 参数文件
*.nmf	MAFET 定义的中性文件
*.m	S、Y、Z 参数矩阵按顺序列出的 Matlab 文件
*.cit	Citifile 格式文件

### 4. 导入文件

在主菜单栏中选择“Modeler→Import”命令，可以导入模型文件的格式，如表 1-6 所示。

表 1-6 HFSS 导入文件

文 件 格 式	文 件 说 明
.dxf, .dwg	AutoCAD 图形文件
.gds	GDSII 标准文件
.geo	Agilent HFSS 实体模型文件
.iges, .igs	IGES 标准文件



续表

文件格式	文件说明
.model	Catia R4/R5 模型文件
.sat	ACIS 几何实体模型文件
.sm3	HFSS 三维模型文件
.step, .stp	AP203 STEP 文件
.prt*, .asm*	Pro/E 模型文件

同样，还可以导入求解数据图表、数据矩阵列表等文件。


1.1.5 HFSS 的启动

HFSS 软件安装完成后，系统会自动在开始菜单和桌面添加软件启动的快捷方式。用户可以通过以下任意一种方式启动软件。

(1) 选择“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，如图 1-3 所示，即可启动 HFSS。



图 1-3 启动 HFSS 软件

(2) 双击桌面上的快捷方式图标来启动软件。

当第一次启动 HFSS 软件时，系统会弹出如图 1-4 所示的提示对话框。



图 1-4 首次启动的提示对话框

单击“确定”按钮，会弹出“General Options”对话框，如图 1-5 所示，要求用户指定一个工作目录（硬盘的一个物理路径），HFSS 会把生成的模型文件、分析结果文件等全部存放在这个工作目录下，方便管理和查找。在“Project Options”栏中，用户可以根据需要，对 HFSS 软件的工程文件保存路径、临时工程文件保存路径及材料库文件的存放路径进行调整，一般默认材料库文件的存放路径不变。如果系统没有自动弹出“General Options”对话框，用户可以在软件主界面的菜单栏中选择“Tools→Options→General Options”命令来打开。

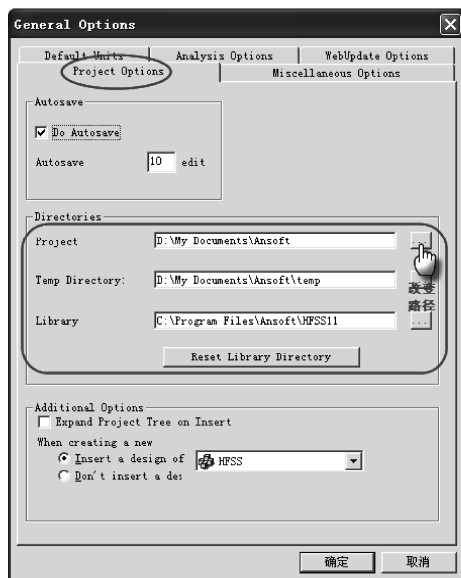


图 1-5 HFSS 的基本配置对话框

**特别说明**

在选择工程文件存放路径中尽量不要出现中文字符，如果路径中含有中文字符，在软件的使用过程中可能出现问题。

设置好路径后，单击“确定”按钮，即可进入 HFSS 软件的主操作界面，如图 1-6 所示。

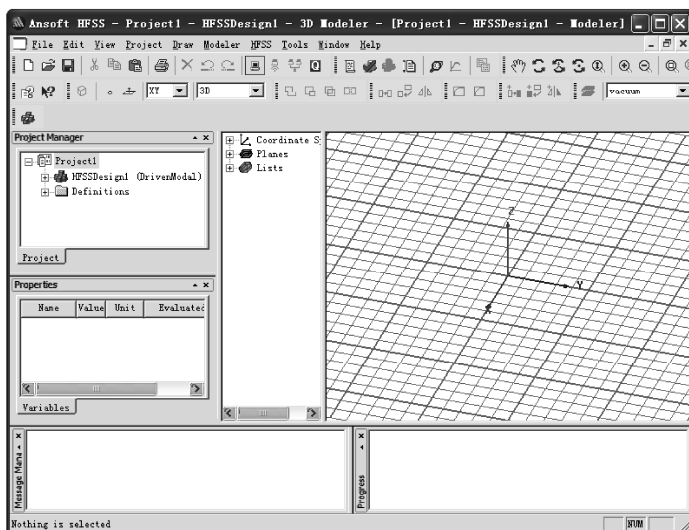


图 1-6 HFSS 软件的主操作界面



## 1.2 入门实例一：T 形波导的内场分析

为了使读者对 HFSS 软件有一个初步的认识，本章选取了两个简单的仿真实例进行介绍。通过这两个简单的仿真应用，读者将会了解 HFSS 的一些基本操作和建模仿真思路。在这两个实例的学习过程中，读者只需按照文字说明一步步进行具体操作（不用过多地考虑具体操作的原理和含义），发现自己感兴趣的地方，然后带着问题和关注点进行下一步的软件学习，这样读者可以更好地根据自己的使用需求有针对性地带着问题学习，使学习有的放矢。在本节，读者将会接触到以下操作和内容。

- (1) 金属波导内尺寸参数的 3D 建模。
- (2) 端口激励的设置。
- (3) 求解相关设置的定义。
- (4) 仿真有效性验证与分析计算。
- (5) 查看数据结果。
- (6) 绘制场分布图。
- (7) 动态演示场分布。
- (8) 查看不同变量值时的仿真结果。

目标：建立一个如图 1-7 所示的带有隔板的三维 T 形波导模型，其中端口一为输入口，端口二、三为输出口；利用 HFSS 软件进行仿真分析、计算，查看  $S$  参数、电压驻波比等数据，并观察波导腔体内场分布随隔板位置的变化情况。

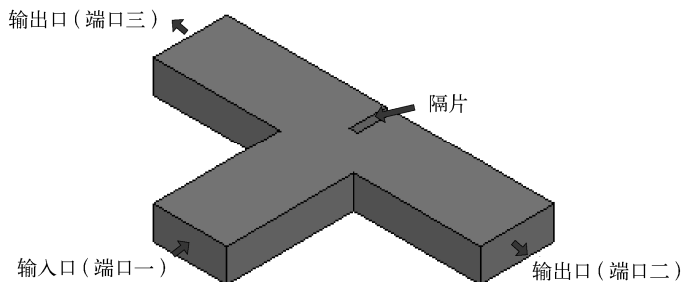



图 1-7 三维 T 形波导模型

### 1.2.1 创建并保存新工程

#### 第一步：启动软件并保存新工程

(1) 可以通过选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令来启动软件，如图 1-8 所示。

(2) 可以通过双击桌面上的快捷方式图标来启动软件。

启动软件后，将出现如图 1-9 所示的操作界面。接下来就可以利用 HFSS 软件进行仿真设计了。



图 1-8 启动 HFSS 软件

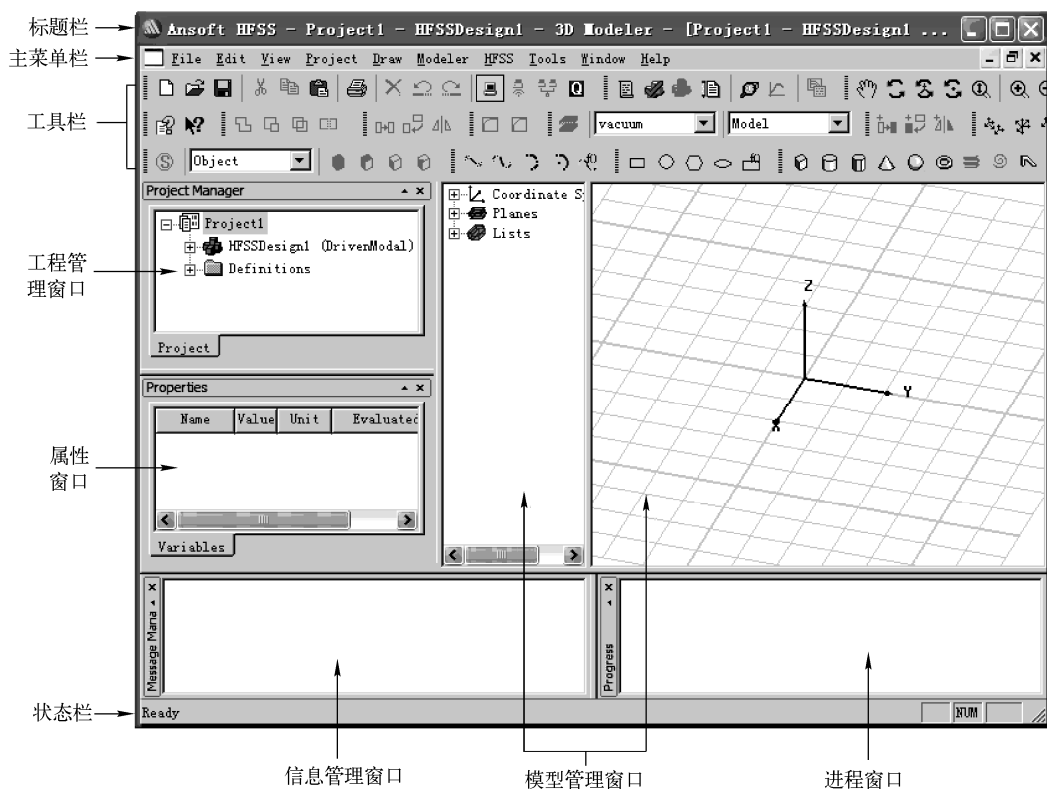


图 1-9 HFSS 的操作界面

当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 在默认时会自带一个新的设计，其名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Model\_Tee。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 Tee，步骤如图 1-10 所示。



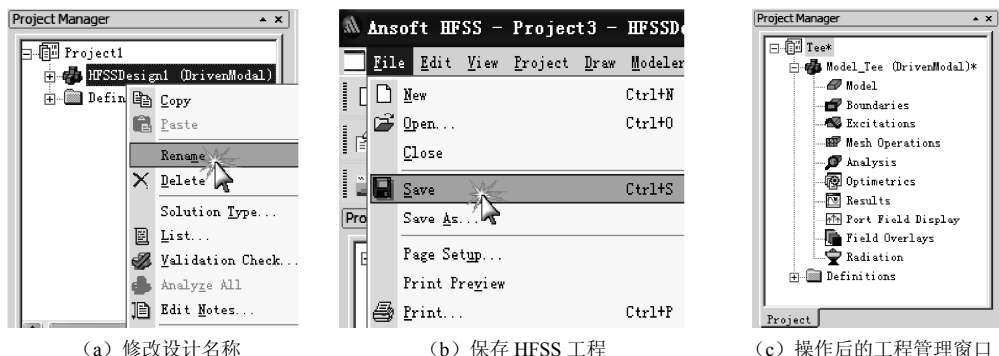


图 1-10 创建并保存新工程

### 第二步：选择求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”项，如图 1-11 所示。

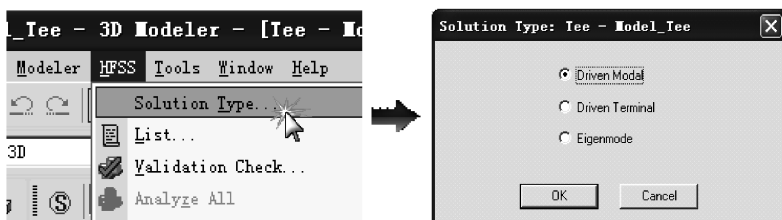


图 1-11 选择求解类型

HFSS 有三种求解类型，分别是模式驱动（Driven Modal）、终端驱动（Driven Terminal）和本征模（Eigenmode），这三种求解类型的特点和区别将在后续章节中详细给出。

### 第三步：设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“in（英寸）”，如图 1-12 所示。

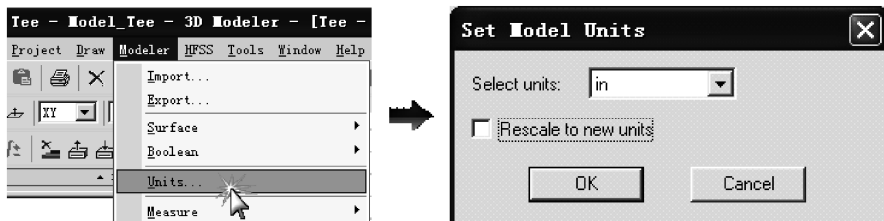


图 1-12 设置模型尺寸单位

### 第四步：定义设计变量

在本例中，我们的主要目的是模拟 T 形波导中隔板位于不同位置时，波导中电磁场的分

布情况，因此这里首先定义一个设计变量来代表隔板距离中心位置的距离，这样在后处理中便可以通过改变该变量的具体数值来观察隔板位于不同位置时 T 形波导内部的场分布情况了。

如图 1-13 所示，在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的设计变量的“Properties”对话框中单击左下角的“Add...”按钮来添加新的设计变量，在弹出的“Add Property”对话框中的“Name”栏输入变量名称 offset，在“Value”栏中给变量赋值 0in，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 offset。

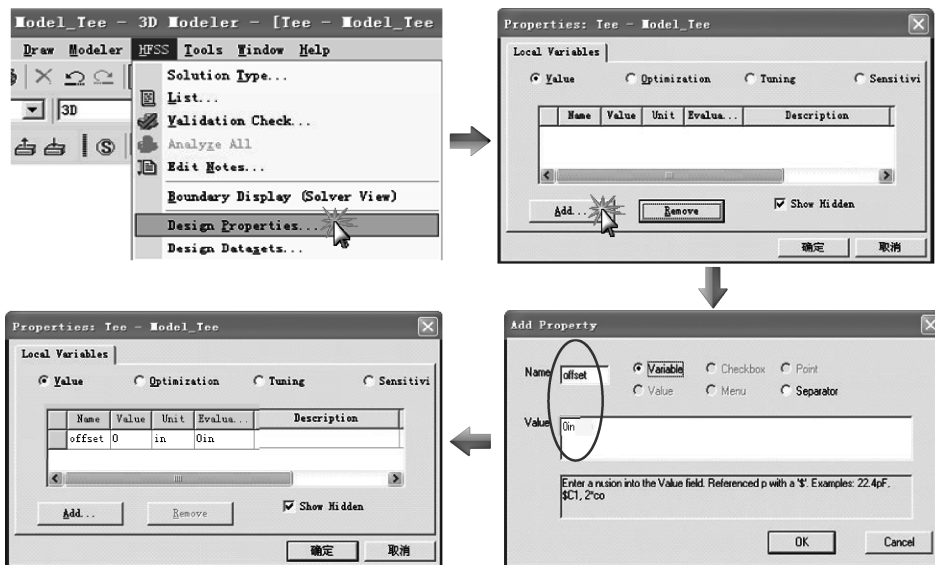


图 1-13 定义设计变量的步骤

## 1.2.2 创建 T 形波导模型

完成仿真的前处理设置后，下面开始着手建立仿真模型。要创建的 T 形波导模型如图 1-14 所示，它是一个三端口的波导连接器，其中端口一是输入口，端口二、三是输出口。与端口一正对的波导壁有一个金属隔板，其位置可以移动，当隔板处于不同位置时，端口二和端口三的输出功率将有所不同。

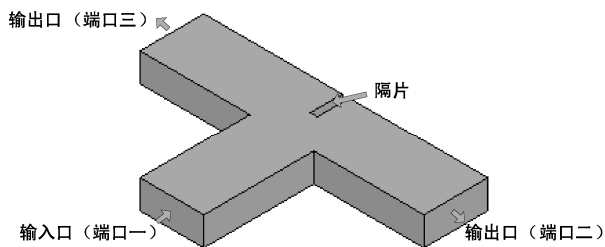


图 1-14 T 形波导模型

## 第一步：创建长方体模型

首先在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，如图 1-15 所示。

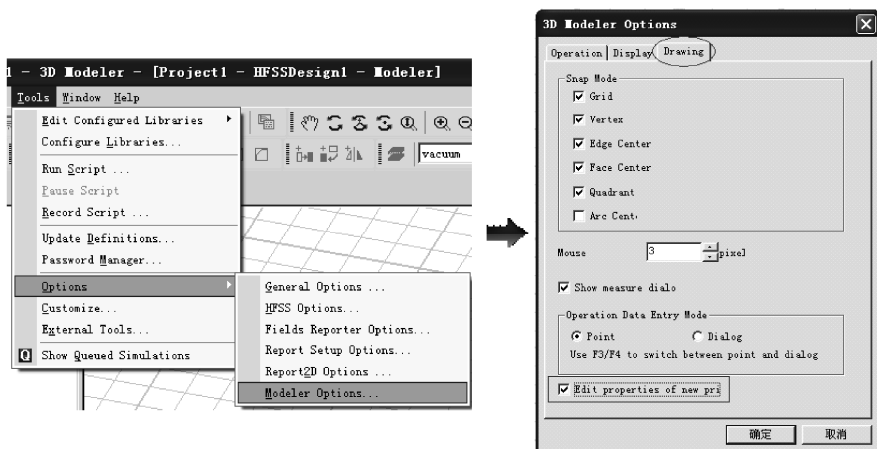


图 1-15 设置“3D Modeler Options”对话框

### 1) 绘制长方体

下面开始创建一个顶点位于坐标点 (0,-0.45,0)，长、宽、高分别为 2in、0.9in 和 0.4in 的长方体模型。首先在主菜单栏的“Draw”选项的下拉菜单中选择“Box”命令，进入尺寸参数设置状态。注意，不要在显示窗口中单击鼠标，应直接在软件界面右下角的状态栏的坐标窗口中分别输入长方体的顶点坐标：X=0，Y=-0.45，Z=0，如图 1-16 所示。

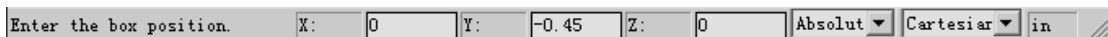


图 1-16 在状态栏中输入长方体的顶点坐标

输入完成后按下 Enter 键确认。随后状态栏中的相应输入项变为 dX, dY, dZ。分别输入长方体的长、宽、高尺寸为 dX=2, dY=0.9, dZ=0.4。注意，设定基点后，其后的位置都是相对于基点而言的，因此，系统会自动选择相对坐标系。

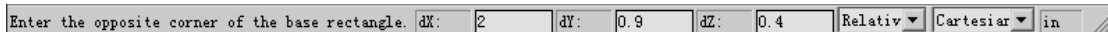


图 1-17 在状态栏中输入长方体的尺寸

### 2) 定义长方体属性

输入完成后按下 Enter 键确认，HFSS 会自动创建一个与输入尺寸相一致的长方体模型，并弹出长方体的“Properties (属性)”对话框，如图 1-18 所示。

图中的“Command”栏中显示的是长方体对应的几何尺寸，其数值可以自由更改；“Attribute”栏中显示的是新建长方体的名称、材料、颜色、透明度等参数。在“Name”项中把长方体的名称由 Box1 改为 Tee，再单击“Transparent”（透明度）将其设为 0.6，最后单

击“确定”按钮完成设置。同时按下 Ctrl 键和 D 键 (Ctrl+D)，可将模型以适合的比例显示在窗口中。



图 1-18 长方体的“Properties (属性)”对话框



#### 特别说明

按下 Alt 键的同时，单击鼠标左键移动鼠标可以旋转模型；按下 Shift 键的同时，单击鼠标左键移动鼠标可以移动模型；同时按下 Alt、Shift 键，单击鼠标左键移动鼠标可以放大、缩小模型。

### 3) 定义波端口激励

(1) 按一下键盘上的 F 键，转换到模型面选择状态，选中长方体平行于 YZ 面、X=2 的端面，如图 1-19 所示。

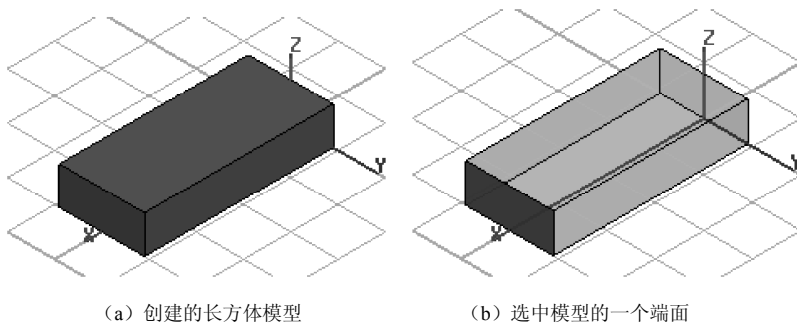


图 1-19 长方体模型

(2) 选中长方体的一个端面后，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation→Wave Port”。

(3) 弹出“Wave Port”界面，输入名称 WavePort1。

(4) 单击“下一步”按钮，单击积分线 (Integration Line) 下的“New line”，则进入绘制端口积分线状态，在状态栏中输入积分线起始点 X、Y、Z 的坐标值 (2,0,0)，按下 Enter 键确定后，继续输入积分线终点的坐标值 (0,0,0.4)，再按下 Enter 键完成积分线的定义。也

可以直接在绘图区的该平面的下边缘中部，即 (2,0,0) 处单击鼠标左键，确定积分线的起始点，再选上边缘中部，即 (2,0,0.4) 处作为积分线的终点。

(5) 此时，弹出“Wave Port”对话框，选择默认设置，单击“下一步”按钮，再单击“完成”按钮结束设置。

整个设置步骤如图 1-20 所示。

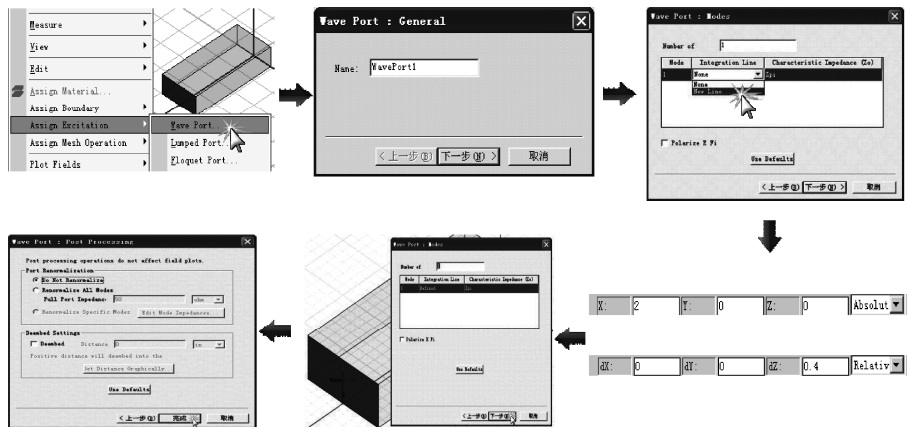


图 1-20 长方体波端口的设置步骤

(6) 在工程树中选择“Model\_Tee”中的“Excitations”节点下的“WavePort1”选项，可选中该端口。设置后的波端口激励如图 1-21 所示。

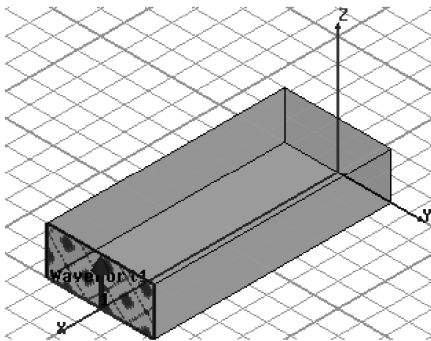


图 1-21 设置后的波端口激励

## 第二步：复制长方体

### (1) 设置“HFSS Options”对话框

选择主菜单栏中的“Tools→Options→HFSS Options”命令，在弹出的“HFSS Options”对话框的“General”选项卡中勾选“Duplicate boundaries with geometry”选项，单击“确定”按钮完成设置，如图 1-22 所示。该设置将确保在复制长方体的过程中，将长方体所带的端口一并复制过去并创建为新的端口激励，以减少对复制的新长方体设置端口激励的步骤。

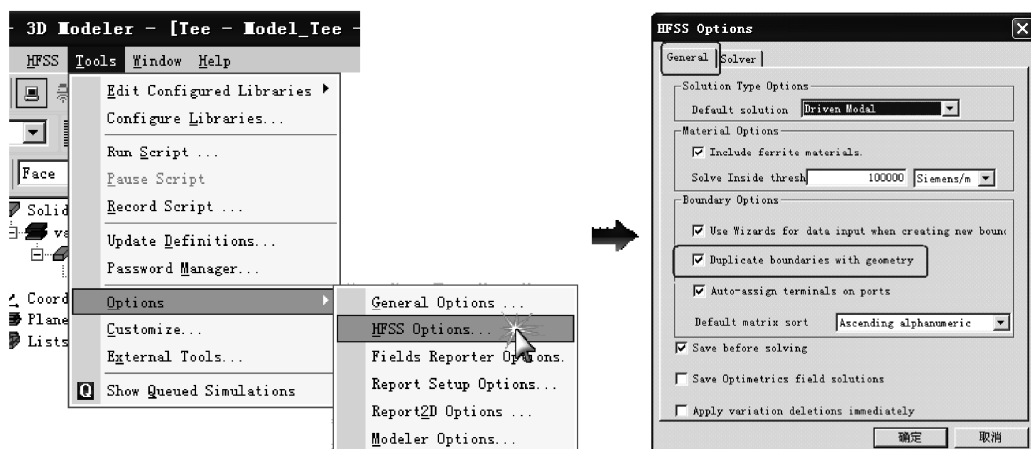


图 1-22 “HFSS Options”对话框的设置

## (2) 复制长方体模型

单击键盘上的 **O** 键，返回物体模型的选择模式，在显示窗口中选择长方体模型，在主菜单栏中选择“Edit→Duplicate→Around Axis”命令，在弹出的对话框的“Axis”项中选择 Z，在“Angle”项输入 90，在“Total number”项输入 2，单击“OK”按钮，则复制、添加第二个长方体，其默认名为 Tee\_1；重复以上步骤，在“Angle”项输入-90，则添加第三个长方体，其默认名为 Tee\_2，如图 1-23 所示。

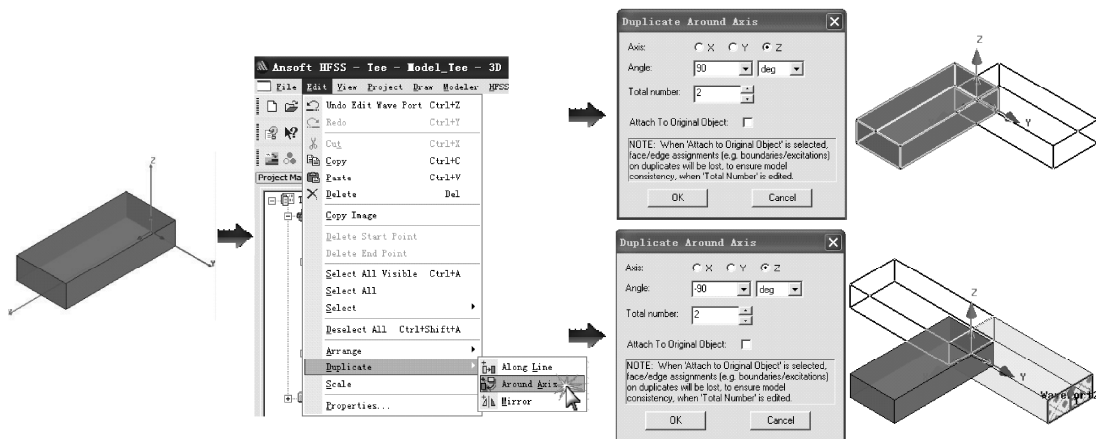


图 1-23 复制长方体生成 T 形波导模型

## 第三步：合并长方体

在显示窗口或设计历史树中选第一个长方体 Tee，按住键盘上的 **Ctrl** 键的同时选中第二、第三个长方体，如图 1-24 (a) 所示，再选择主菜单栏中的“3D Modeler→Boolean→Unite”命令，则将三个长方体组合在一起，形成了一个带有三个端口的完整的 T 形波导，如图 1-24 (b) 所示。

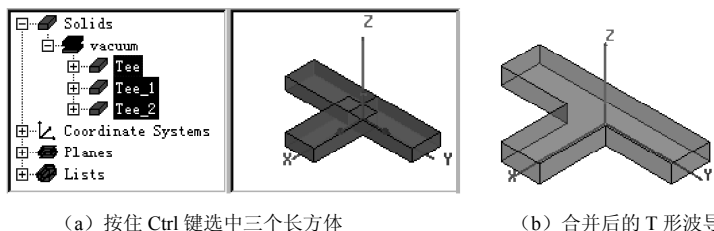


图 1-24 合并生成 T 形波导模型

#### 第四步：创建长方体隔板

##### 1) 绘制长方体隔板

在主菜单栏的“Draw”选项的下拉菜单中选择“Box”命令，进入尺寸参数设置状态。不要在显示窗口中单击鼠标，可直接在软件界面右下角的状态栏的坐标窗口中分别输入长方体的顶点坐标：X=-0.45，Y=-0.05，Z=0，如图 1-25 所示。



图 1-25 输入长方体隔板的起始点坐标

输入完成后按下 Enter 键确认。随后状态栏中相应的输入项变为 dX, dY, dZ。分别输入长方体的长、宽、高尺寸为 dX=0.45, dY=0.1, dZ=0.4，如图 1-26 所示，按 Enter 键确定。



图 1-26 输入长方体隔板的长、宽、高

在弹出的长方体隔板的属性对话框的“Attribute”标签页中，在“Name”栏输入 septum；在“Command”栏中将长方体顶点坐标中的 Y 坐标改为 offset-0.05in，其他不变，单击“确定”按钮，完成设置，如图 1-27 所示。

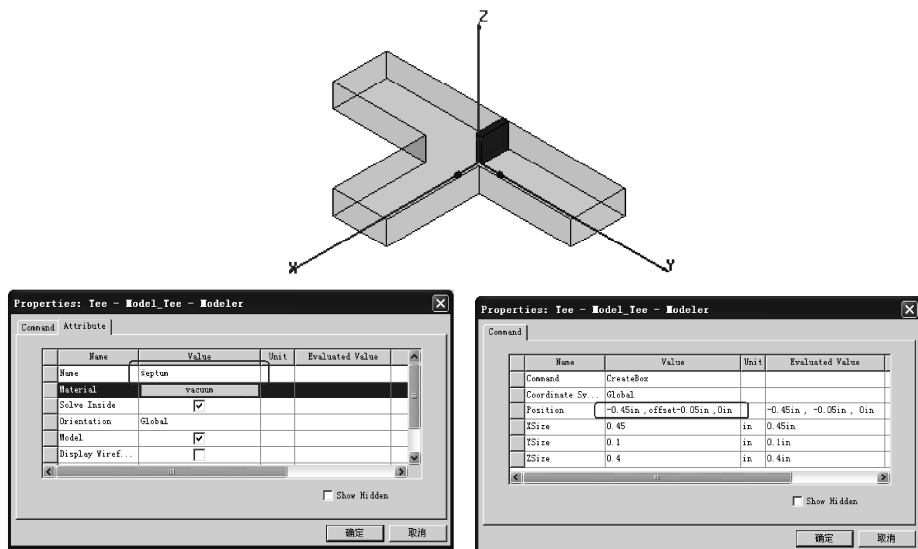


图 1-27 创建的长方体隔板及其属性对话框

## 2) 从 T 形波导中剪去隔板

在历史树中选择“Tee”项，按住键盘上的 Ctrl 键的同时选中“septum”项，如图 1-28 (a) 所示，再选择主菜单栏中的“3D Modeler→Boolean→Subtract”命令，在弹出的对话框中确定 Tee 在 Blank Parts 列，septum 在 Tool Parts 列（即将隔板从 T 形波导中剪掉），单击“OK”按钮，操作完成后的 T 形波导如图 1-28 (b) 所示。

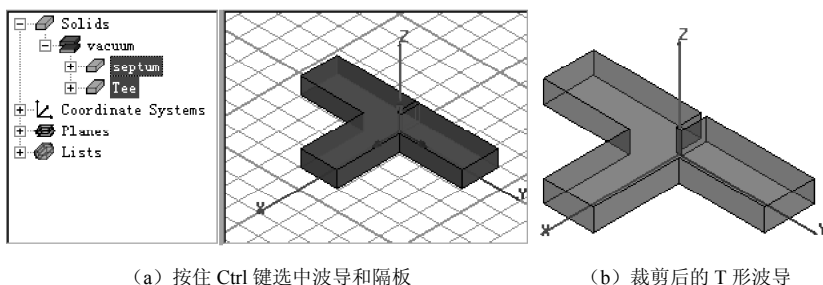


图 1-28 从 T 形波导中减去隔板

## 1.2.3 添加仿真的基本设置

### 第一步：添加求解设置

如图 1-29 所示，在工程管理窗口中找到 Model\_Tee 管理树，在其中的“Analysis”节点上单击鼠标右键，选择“Add Solution Setup”命令，弹出“Solution (求解设置)”对话框，在“General”选项卡的“Solution Frequency”项输入 10，单位为 GHz，在“Adaptive Solutions”栏的“Maximum Number of Passes”项输入 6，其他不变，单击“确定”按钮，完成自适应求解设置。操作完成后会在 Analysis 节点下添加一个求解设置项，其默认名为 Setup1。

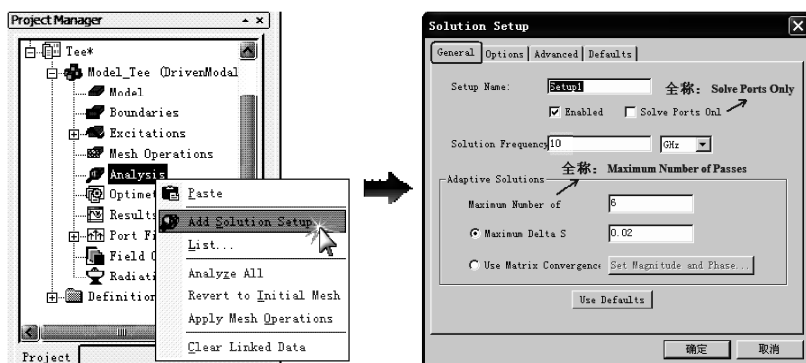


图 1-29 添加求解设置

### 第二步：添加频率扫描设置

如图 1-30 所示，在 Model\_Tee 管理树中找到刚刚添加的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，选择“Add Frequency Sweep...”命令，在弹出的“Edit Sweep”对话框中：“Sweep Name”项保存默认，“Sweep Type”项选择 Fast；“Frequency Setup”栏的“Type”项选择



Linear Step, 定义频率扫描范围为: Start 为 8GHz, Stop 为 10GHz, Step Size 为 0.05GHz, 单击“OK”按钮, 则在 Setup1 节点下增加了一个频率扫描项, 其默认名为 Sweep1。

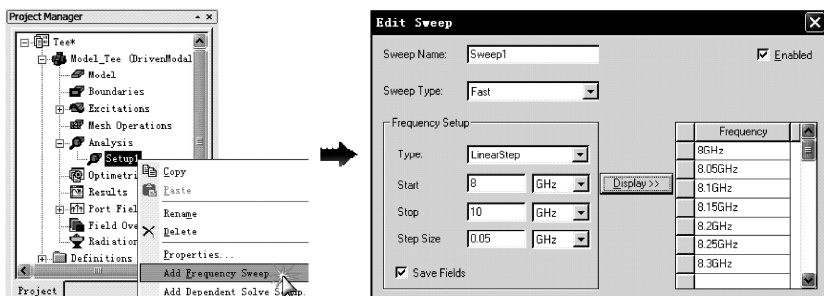


图 1-30 添加频率扫描设置

### 第三步: 添加参数扫描设置

在工程管理窗口的管理树中找到“Optimetrics”节点, 选中它并单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Add”子菜单中的“Parametric...”命令, 在弹出的“Setup Sweep Analysis”对话框中单击右上角的“Add...”按钮, 在弹出的“Add/Edit Sweep”对话框中将“Variable”项设为 offset, 再选择“Linear step”项, 将变量起始值和步长分别设为 0in、1in 和 0.1in, 然后单击窗口中部的“Add...”按钮将扫描添加到右侧变量栏中, 单击“OK”按钮返回上一级菜单, 将看到变量扫描项位于变量列表中。接下来选择“Setup Sweep Analysis”对话框中的“Options”选项卡, 勾选“Save Fields And Mesh”复选框, 单击“确定”按钮。操作完成后, 参数扫描设置会自动添加到“Optimetrics”节点下, 其默认名称为 ParametricSetup1。具体设置步骤如图 1-31 所示。

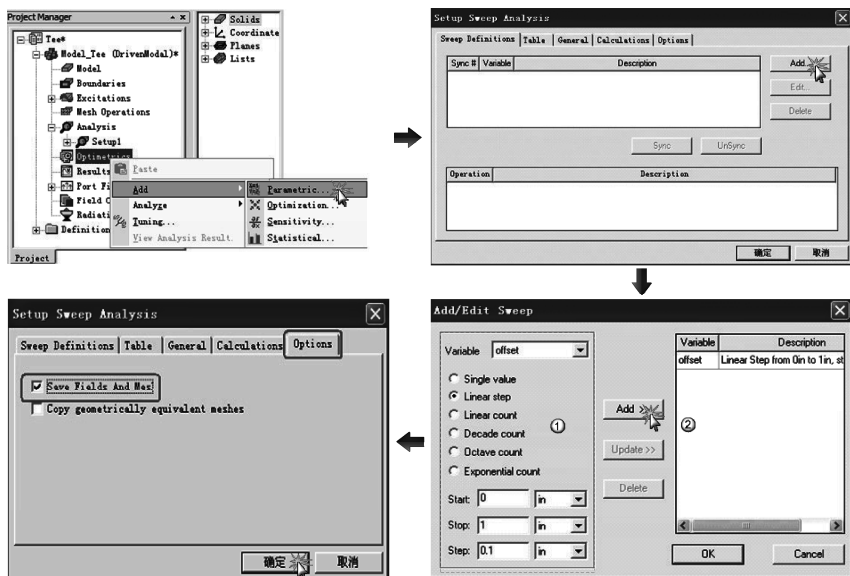



图 1-31 添加参数扫描设置步骤

## 1.2.4 仿真有效性验证及分析

### 第一步：仿真有效性验证

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，弹出有效性验证窗口，验证仿真设计的完整性和正确性。如图 1-32 所示。当验证窗口右侧各项前端都显示图标时，说明当前的仿真设计没有错误，单击“Close”按钮结束。

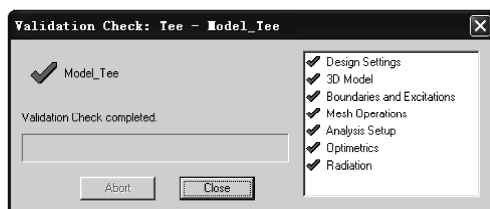


图 1-32 有效性验证窗口

至此便完成了仿真建模的所有步骤，接下来将对设计的模型进行仿真计算分析，并对我们所关注的结果进行查看和整理。

### 第二步：运行仿真计算

选择主菜单栏中的“HFSS→Analyze”命令，对仿真模型进行三维场分析计算。求解全部完成后，在信息管理区会出现确定信息。进程窗口如图 1-33 所示，信息管理窗口如图 1-34 所示。

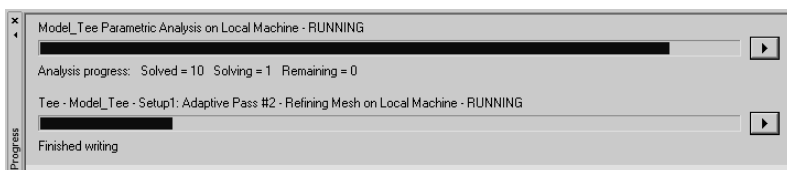


图 1-33 进程窗口

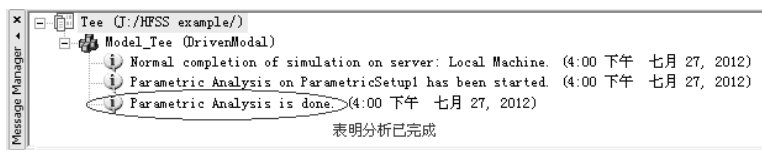


图 1-34 信息管理窗口

## 1.2.5 查看 T 形波导的内场分布

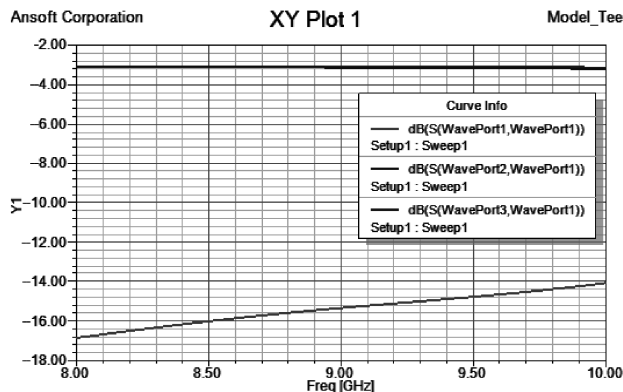
### 1. 查看 S 参数

分析完成后，就可以通过 HFSS 强大的后处理模块来查看关心的参数结果了。首先来查看一下 T 形波导三端口网络的 S 参数，即绘制一个 S 参数的矩形曲线图，绘制步骤如图 1-35 所示。

图 1-35 绘制  $S$  参数曲线的步骤

第一步：在工程管理窗口的管理树中的“Results”项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report”中的“Rectangular Plot”命令，弹出“Report”对话框。

第二步：在“Report”对话框的“Trace”选项卡下设置曲线的相关参数：在对话框中部的“Category”列选择 S Parameter；在“Quantity”列，按下 Ctrl 键的同时，选择 S (WavePort1, WavePort1)、S (WavePort2, WavePort1)、S (WavePort3, WavePort1) 项；在“Function”列选择 dB。选择完成后切换至“Families”选项卡，勾选“Available variations”复选框，并在其对应的列表中勾选“0in”项，即曲线图中只显示隔板位于正中间位置时的  $S$  参数。设置完成后单击对话框下方的“New Report”按钮，软件显示窗口中将出现相应的曲线图形，单击“Close”按钮，便在工程树的“Results”项下加入该图表项，其默认名为 XY Plot 1，并且在右侧显示窗口的矩形图中显示出隔板位于 0in 时的  $S$  参数曲线，如图 1-36 所示。

图 1-36 隔板位于 0in 时的  $S$  参数曲线图

同理，按照此方法，还可以参看隔板位于不同位置时的各项  $S$  参数。

## 2. 创建二维场覆盖图

### 第一步：定义隔板的位置

首先确定“Properties”窗口已经打开，否则由主菜单栏选择“View→Properties Window”命令，显示“Properties”窗口。在工程树中选择“Model\_Tee”项，则在“Properties”窗口中会出现“Variables”标签页，其中设计变量栏中的“offset”变量的“Value”栏为0in，如图1-37所示。

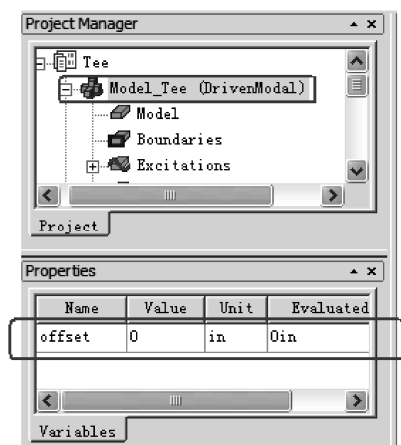


图 1-37 选中设计名称时属性窗口中的设计变量

### 第二步：定义场分布

双击工程树中的“Model\_Tee”项，返回绘图窗口，同时按下 Ctrl 键和 D 键 (Ctrl+D)，将模型以适合的比例显示。在绘图区单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Select Faces”项（或者按下键盘上的 F 键），切换到面选择模式，单击鼠标左键选中 T 形波导的上表面，在上表面被选中的状态下，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Plot Fields→E→Mag\_E”命令，在弹出的对话框的“Solution”项选择 Setup1: LastAdaptive，其他选项保持默认设置，单击“Done”按钮，便在工程树的“Field Overlays”节点下加入该场图，其默认名为 Mag\_E1，并且在 T 形波导的上表面显示出场分布情况，如图1-38所示。

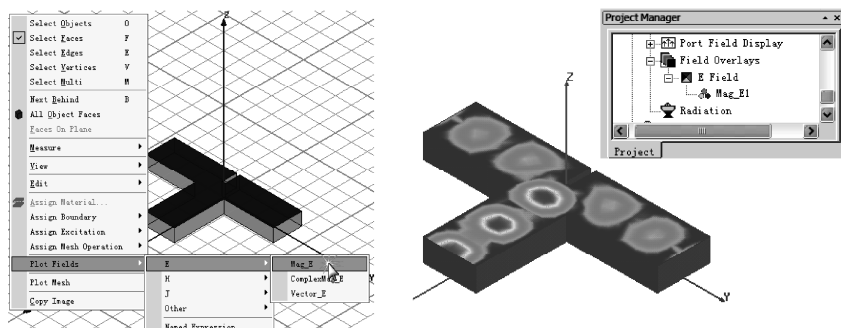


图 1-38 在模型上表面创建电场幅度分布

### 第三步：查看隔板位于不同位置时的场分布

由于在参数扫描分析时已经计算了不同位置时的结果，所以在查看结果时，可以直接改变设计变量的数值，软件将自动计算隔板位于对应位置时的场分布。具体操作就是在工程树中选中设计名称，在其下面的属性窗口中出现设计变量列表，在变量列表的“Value”栏中直接修改变量的值（要在参数扫描的设置范围之内），如依次将“Value”中的值修改为 0.2in、0.6in 和 1in，以此来查看隔板位于这些位置时的场分布情况，如图 1-39 所示。

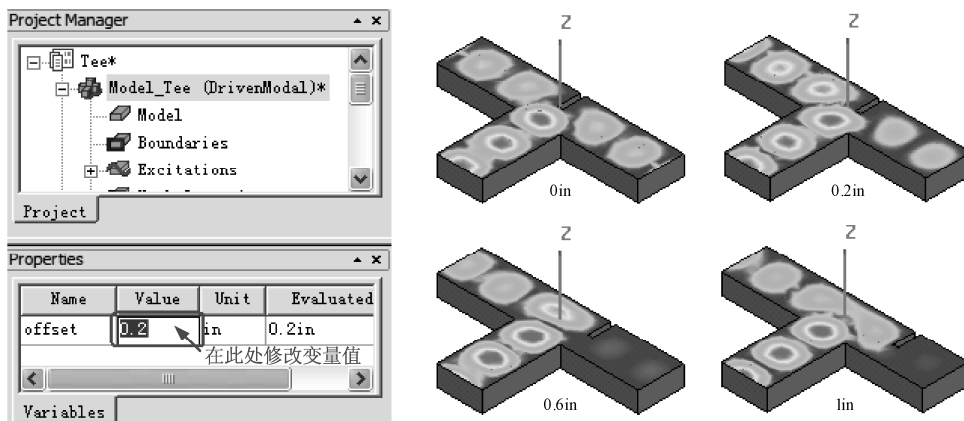


图 1-39 隔板位于不同位置时的场分布

### 3. 创建三维场分布图

双击工程树中的“Model\_Tee”项，返回绘图窗口，同时按下 Ctrl 键和 D 键（Ctrl+D），将模型以适合的比例显示。首先删除工程树中的“Field Overlays”节点下名为 Mag\_E1 的场分布图，然后在绘图区单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Select Objects”项，再选中 T 形波导三维模型，并在选中的状态下单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Plot Fields→E→Mag\_E”命令，再在弹出的“Create Field Plot”对话框中保持默认设置不变，最后单击“Done”按钮，这样在 Field Overlays 节点下会自动添加一个名为 Mag\_E1 的场分布图，并显示在模型窗口中，如图 1-40 所示。

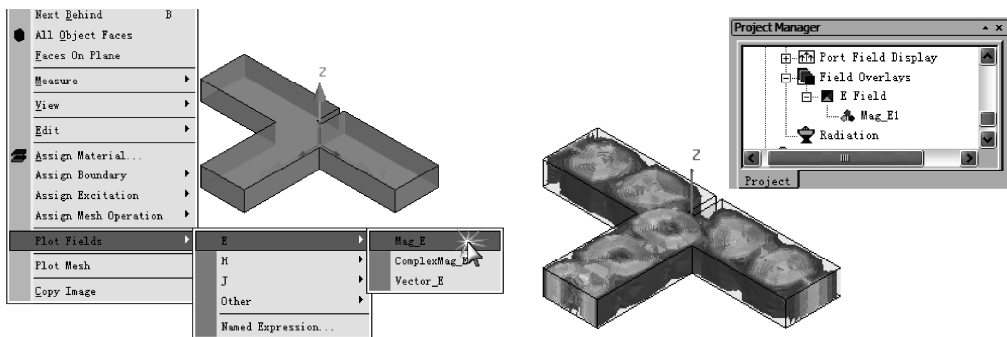


图 1-40 创建三维场分布图

如果场分布为点状云图, 则可通过设置场分布属性进行修改, 具体步骤为: 在工程树中的“Field Overlays”节点处单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Modify Attributes...”命令, 弹出“Select Plot Folder”对话框, 单击“OK”按钮继续, 在弹出的场分布属性的“E Field”对话框中选择“Plots”选项卡, 在“Scalar plot”栏中勾选“IsoValSurface”复选框, 单击“Apply”按钮应用, 再单击“Close”按钮关闭属性窗口, 如图 1-41 所示。

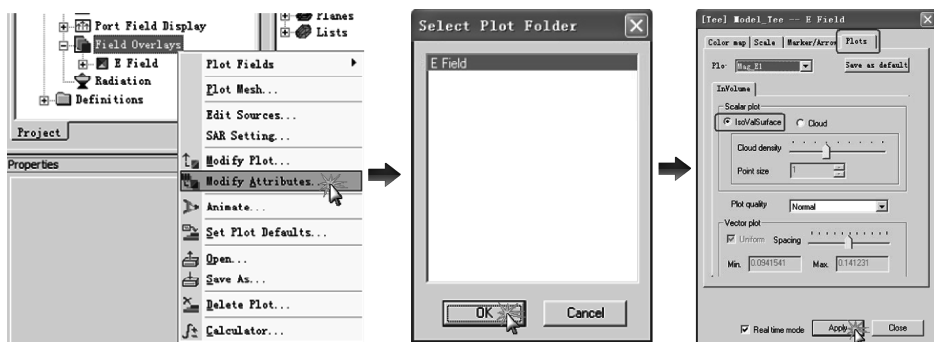


图 1-41 修改场分布属性

参照二维场分布图的查看方法, 同理可以查看隔板位于不同位置时的三维立体场分布情况。

#### 4. 动态演示场分布图

在工程树的“Mag\_E1”上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Animate”命令, 在弹出对话框中的“Swept Variable”标签页下选择“Swept”为 Phase, 定义起始范围为 0~360deg, 步数为 18, 再单击“OK”按钮, 弹出“Animation”对话框, 在该对话框中可以控制演示的进程, 包括开始、停止、演示速度、帧顺序等。修改变量 offset 的数值重新演示, 注意观察场分布的情况, 并重点比较 2、3 端口的场分布差异。

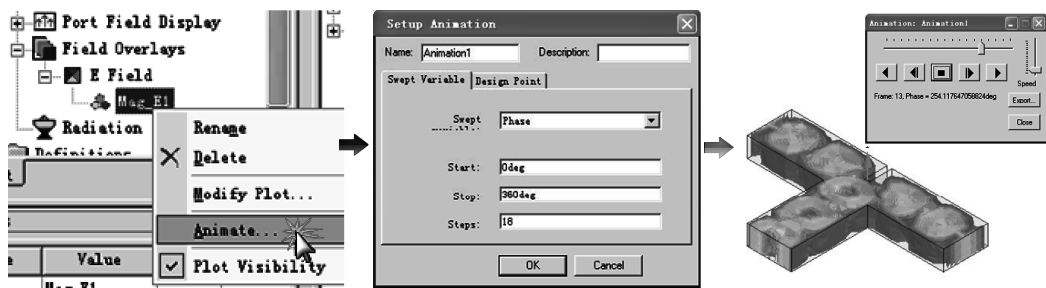


图 1-42 场分布的动态演示

至此便完成了 T 形波导的三维建模、仿真设置, 并且分析、计算及查看了相关的计算结果。

### 1.2.6 保存并退出 HFSS

- (1) 选择主菜单栏中的“File→Save”命令, 保存该工程。
- (2) 选择主菜单栏中的“File→Close”命令, 关闭工程。
- (3) 选择主菜单栏中的“File→Exit”命令, 退出 HFSS 软件。



## 1.3 入门实例二：对称偶极子天线远场分析

在本入门实例中，读者将会接触到以下操作和内容：

- (1) 对称偶极子天线的三维参数建模；
- (2) 集总端口激励的设置；
- (3) 求解相关设置的定义；
- (4) 辐射边界条件的定义；
- (5) 仿真有效性验证与分析计算；
- (6) 查看数据结果；
- (7) 绘制天线远区辐射方向图；
- (8) 查看不同天线臂长时天线的辐射特性。

目标：建立一个如图 1-43 所示的对称偶极子天线模型，利用 HFSS 软件进行仿真分析，查看天线工作在 3GHz 时的远场归一化辐射方向图等辐射特性，并观察天线臂长与波长为不同比例关系时对称偶极子天线的远场方向图的变化情况。

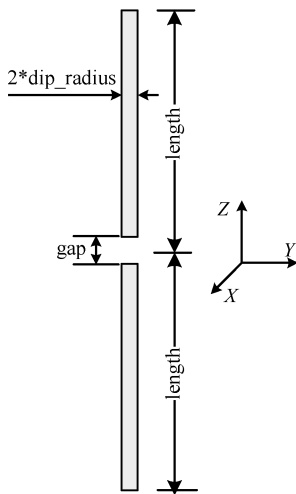



图 1-43 对称偶极子天线模型

### 1.3.1 创建并保存新工程

#### 第一步：启动软件并保存新工程

首先通过选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令或双击桌面上的快捷方式图标来启动软件。当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认会自带一个新的设计，其名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Model\_Dip。



再选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为Dipole，如图 1-44 所示。

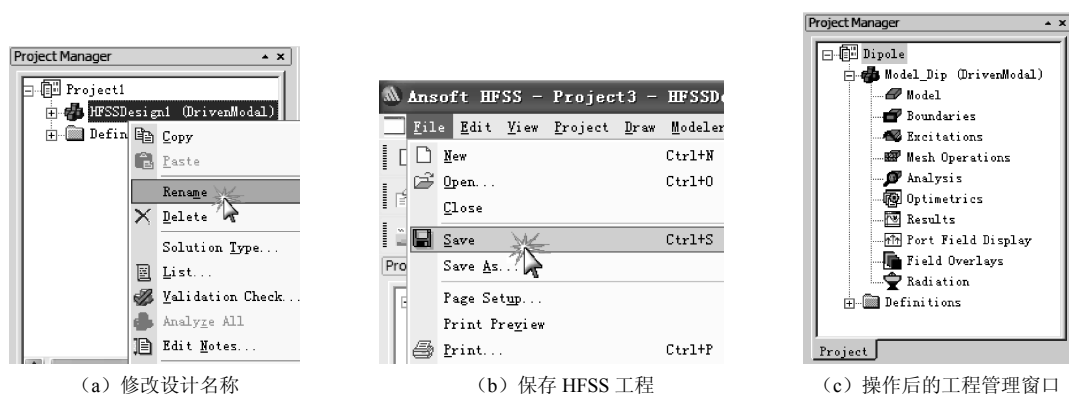


图 1-44 创建并保存新工程

## 第二步：选择求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”项，如图 1-45 所示。

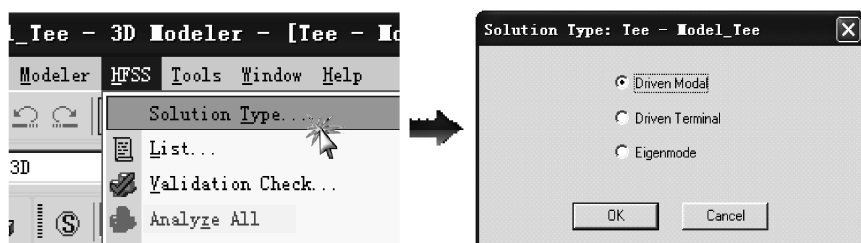


图 1-45 选择求解类型

## 第三步：设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”，如图 1-46 所示。

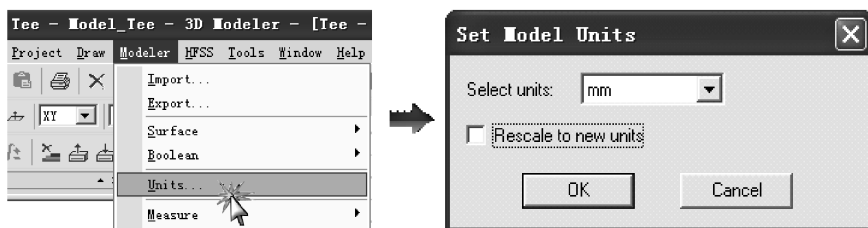


图 1-46 设置模型尺寸单位





第四步：定义设计变量

在本例中，主要目的是查看天线臂长与波长为不同比例关系时的辐射特性，因此首先定义一下要用到的变量：设定对称偶极子天线的工作频率为 3GHz，天线沿 Z 轴方向放置，中心位于坐标原点，天线材质采用理想导体，总长度为  $0.5\lambda$ ，半径为  $\lambda/200$ ；天线采用集总端口激励方式，端口距离为 0.4mm，辐射边界到天线的径向距离为  $\lambda/4$ ，辐射边界到天线的轴向距离为  $\lambda/10$ ，如表 1-7 所示。

表 1-7 定义设计变量

变量名称	含义	表达式（数值）
Lambda	工作波长	100mm
k	天线臂长与波长的比值	0.25
length	天线单臂长	$k \times \text{lambda}$
gap	激励端口高度	0.4 mm
dip_radius	圆柱形天线臂半径	$\text{lambda}/200$
rad_radius	圆柱形辐射边界半径	$\text{dip\_radius} + \text{lambda}/4$
rad_height	辐射边界圆柱体高度	$2 \times \text{length} + \text{lambda}/10$

如图 1-47 所示，在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties”命令，在弹出的“Properties”对话框中单击左下角的“Add...”按钮来添加新的设计变量，在弹出的“Add Property（添加属性）”对话框中的“Name”栏输入变量名称 Lambda，在“Value”栏中给变量赋值 100mm，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 Lambda。

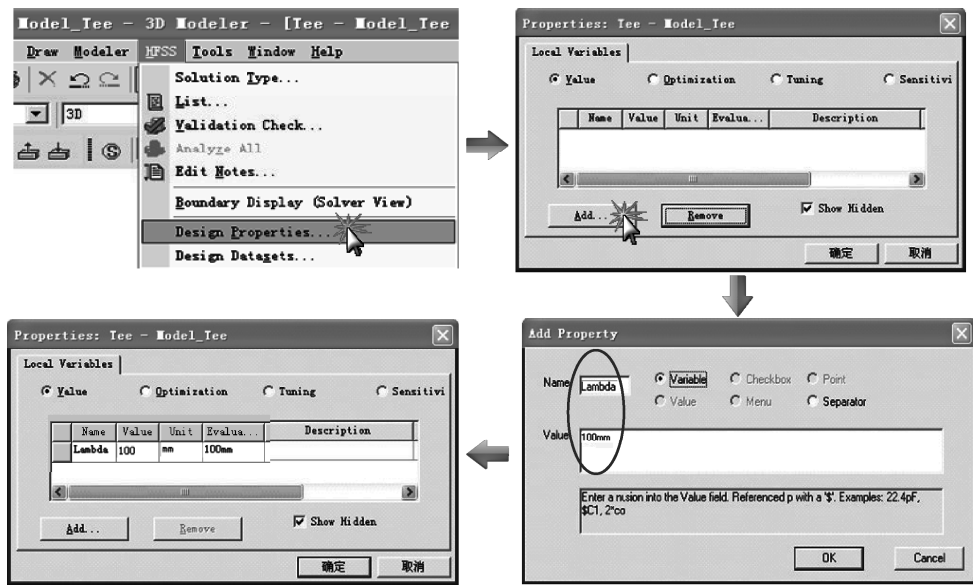


图 1-47 添加设计变量

重复以上步骤添加其他设计变量。最后得到的工程设计变量列表如图 1-48 所示。

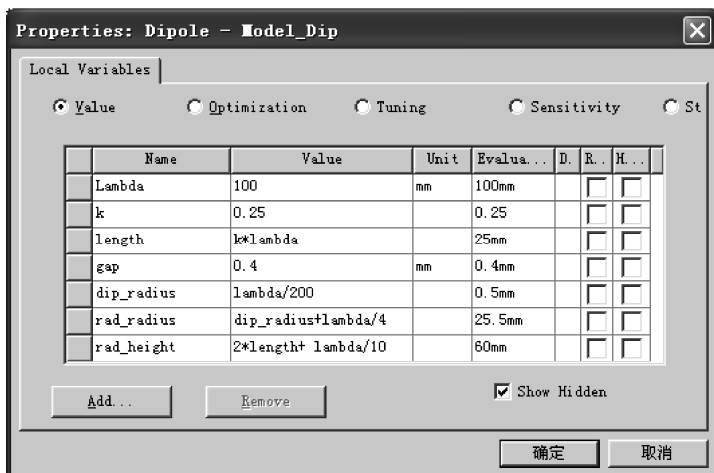



图 1-48 工程设计变量列表

## 1.3.2 创建偶极子天线模型

### 第一步：创建偶极子天线臂

#### 1. 创建任意圆柱体

在主菜单栏中选择“Draw→Cylinder”命令或单击工具栏上的图标按钮，按照图 1-49 所示步骤创建一个任意大小的圆柱体。

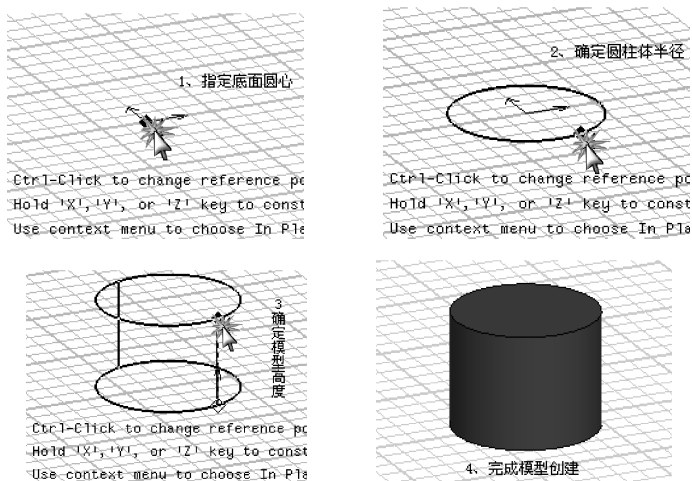


图 1-49 圆柱体创建过程

#### 2. 修改圆柱体属性

新建的圆柱体会添加到操作历史树的“Solids”节点下，其默认名称为 Cylinder1。双击

图 1-50 中的操作历史树中的“Solids”下的“Cylinder1”节点，打开圆柱体属性对话框的“Attribute”选项卡，如图 1-50 所示。

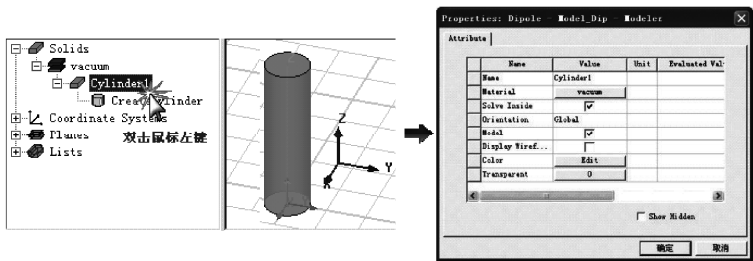


图 1-50 打开“Attribute”选项卡

将“Name”项中的 Cylinder1 修改为 dipole；单击“Material”项中的 vacuum，进入模型材料的“Properties（属性）”选择对话框，选择圆柱体的材料名称为 pec（理想导电体），如图 1-51 所示。修改后的“Attribute”选项卡如图 1-52 所示。

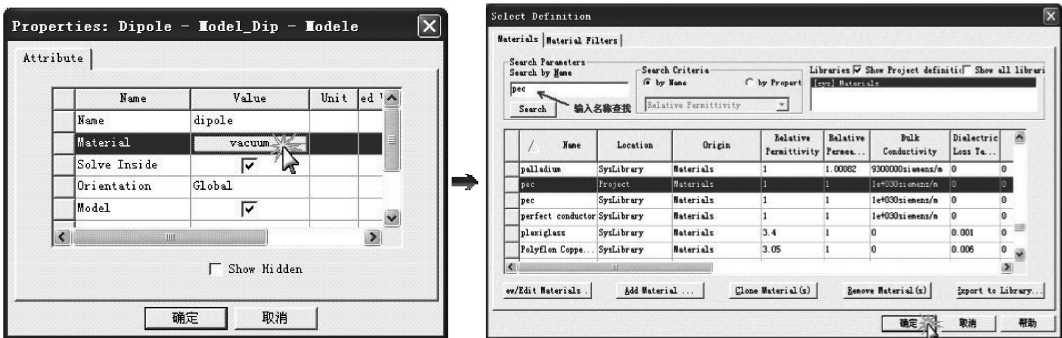


图 1-51 设置圆柱体材料属性

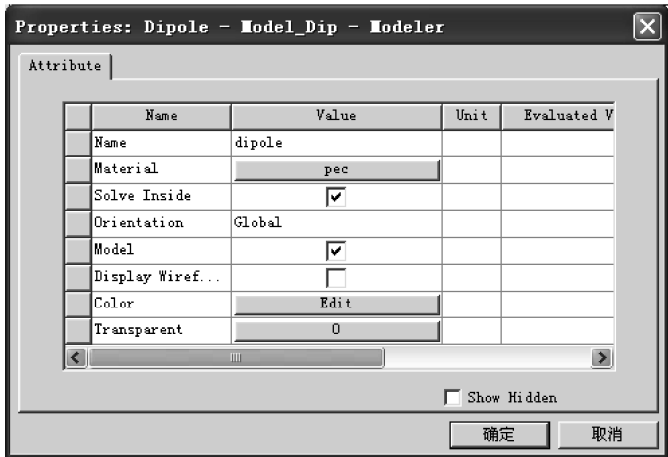


图 1-52 修改后的“Attribute”选项卡

双击图 1-53 中的操作历史树中的“dipole”下的“CreateCylinder”节点，打开圆柱体属性对话框的“Command”选项卡。

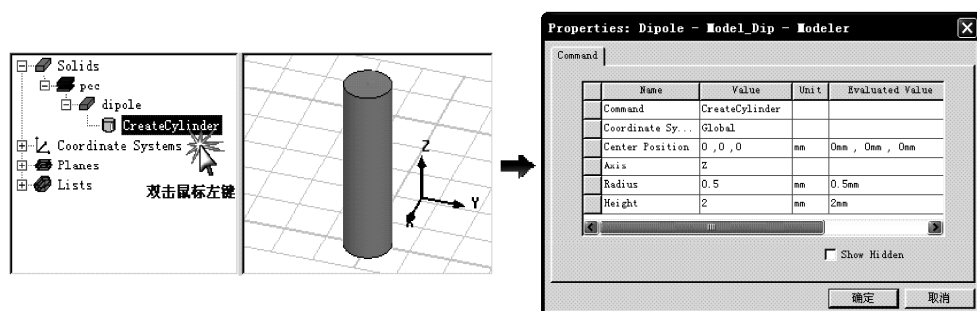


图 1-53 打开“Command”选项卡

对各项依次进行修改，其中“Center Position（圆心坐标）”修改为（0mm，0mm，gap/2）；“Axis（对称轴）”设为 Z 轴；“Radius（圆柱体半径）”修改为 dip\_radius；“Height（圆柱体高度）”修改为 length。修改后的“Command”选项卡如图 1-54 所示。

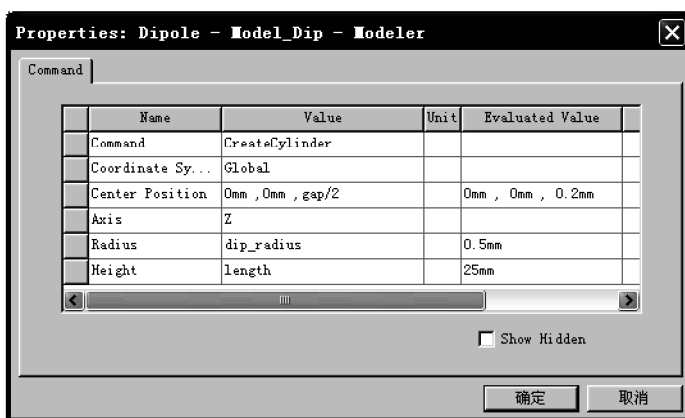


图 1-54 修改后的“Command”选项卡

单击“确定”按钮完成操作，按下快捷键 Ctrl+D 以适当比例显示模型，如图 1-55 所示。

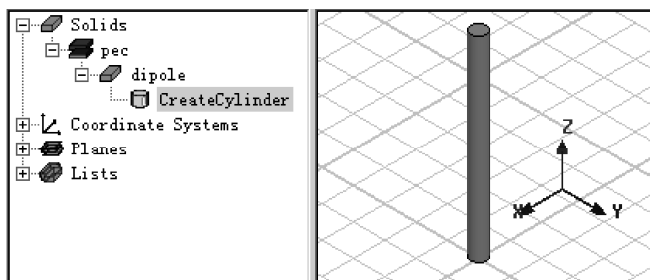



图 1-55 天线的单臂模型



### 3. 复制生成天线的另一臂

选中新创建的圆柱体 dipole，从主菜单栏中选择“Edit→Duplicate→Around Axis”命令或单击工具栏上的快捷按钮，执行沿坐标轴复制操作，在弹出的“Duplicate Around Axis”对话框中选择“Axis（旋转轴）”为 X 轴；“Angle（旋转角度）”为 180deg；“Total number（模型总数量）”为 2，单击“OK”按钮确认，即可将圆柱体 dipole 沿 X 轴旋转 180°，复制生成偶极子天线的另一臂，同时复制生成的模型自动命名为 dipole\_1。再次按下 Ctrl+D 键可显示模型。复制步骤具体如图 1-56 所示。

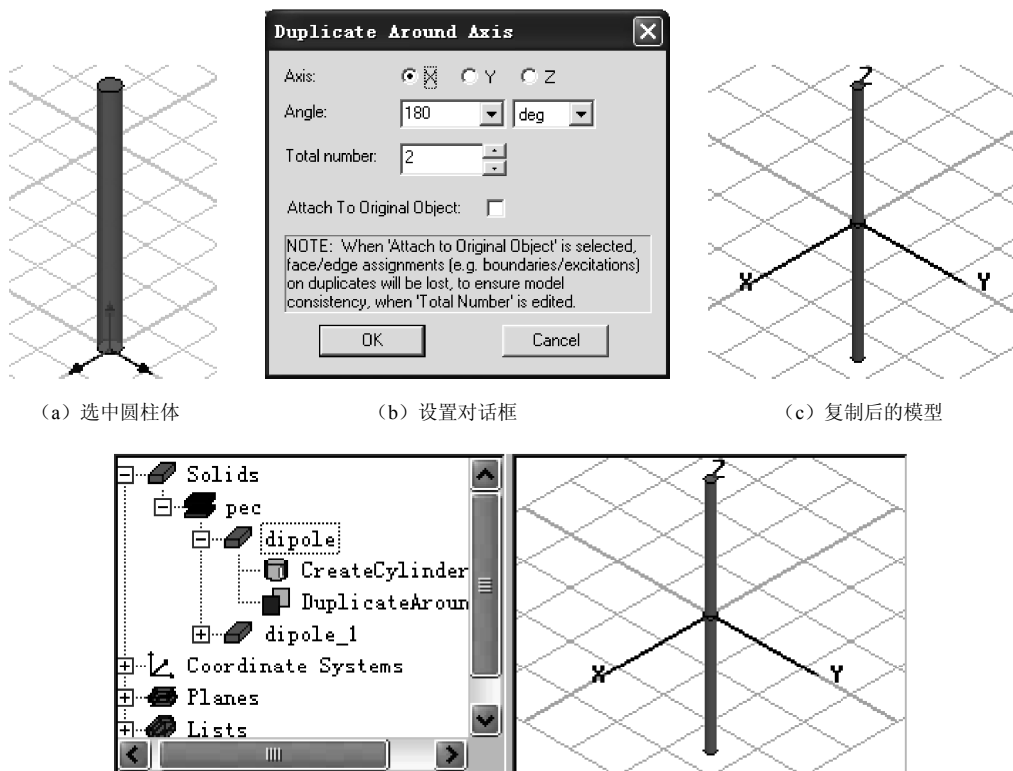



图 1-56 复制生成天线的另一臂

### 第二步：设置端口激励

在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮，执行矩形平面绘制命令后，用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。

操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 Rectangle1，位于操作历史树中的“Sheets”节点下。双击“Rectangle1”节点，打开属性对话框的“Attribute”选项卡，将“Name”修改为 port，“Color”修改为红色，其他设置保持默认，如图 1-57 所示。



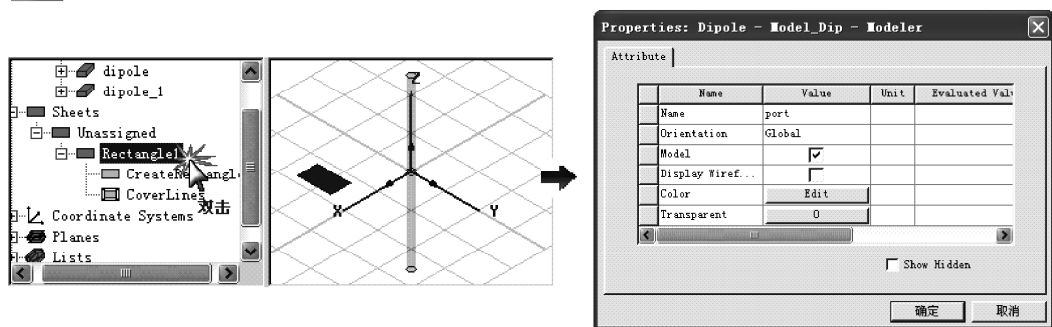


图 1-57 绘制任意矩形并修改“Attribute”选项卡

用鼠标双击“port”中的“CreateRectangle”节点，打开属性对话框中的“Command”选项卡，对矩形面的结构参数进行修改和调整，如下所示。

- (1) Position: 模型结构的起始点坐标，修改为 0mm, -dip\_radius, -gap/2。
  - (2) Axis: 平面模型的法向坐标轴，选择 X 轴，则平面位于与 X 轴垂直的坐标平面内。
  - (3) 平面的长、宽尺寸为 YSize 和 ZSize，分别修改为 2\*dip\_radius 和 gap。
- 修改后的“Command”选项卡如图 1-58 所示。

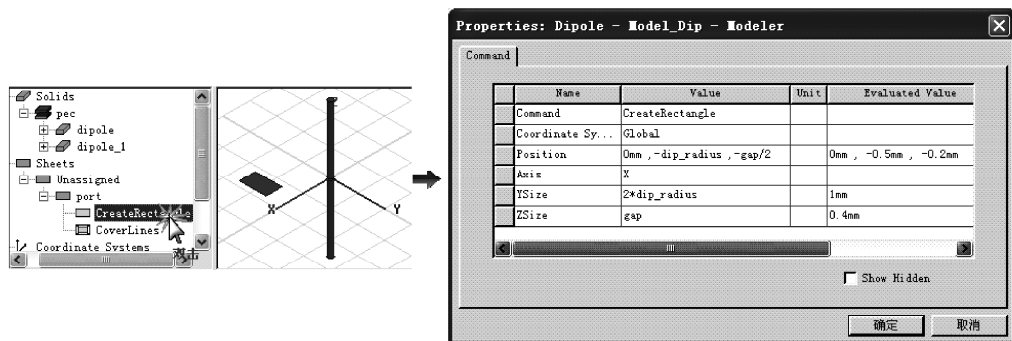


图 1-58 修改后的“Command”选项卡

至此便完成了在天线两臂之间创建一个激励平面，如图 1-59 所示。

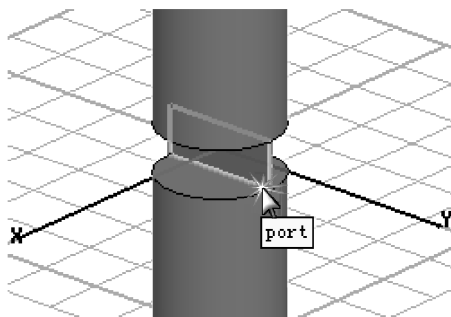


图 1-59 添加端口激励平面

选中刚刚创建好的 port 平面，在选中的状态下在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation”中的“Lumped Port”命令，如图 1-60 所示。

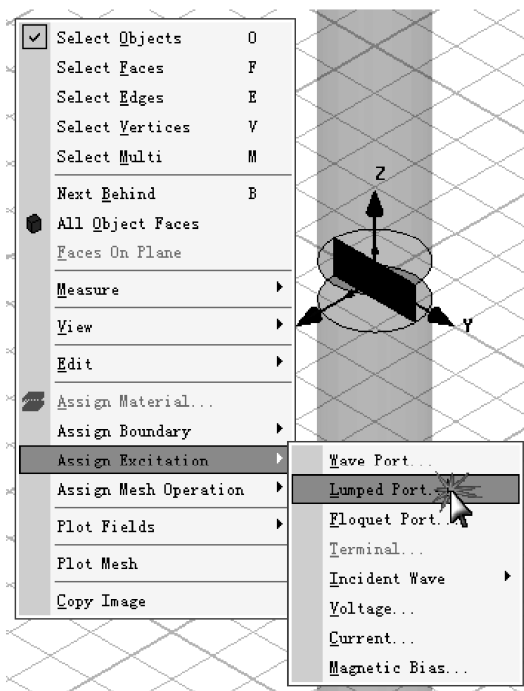


图 1-60 选中激励平面并执行添加端口激励命令

在弹出的“Lumped Port: General (通用)”对话框中单击“下一步”按钮继续，在弹出的“Lumped Port: Modes (模式)”对话框中单击“None”右边的倒三角形，选择“New Line...”命令来绘制积分线，如图 1-61 所示。

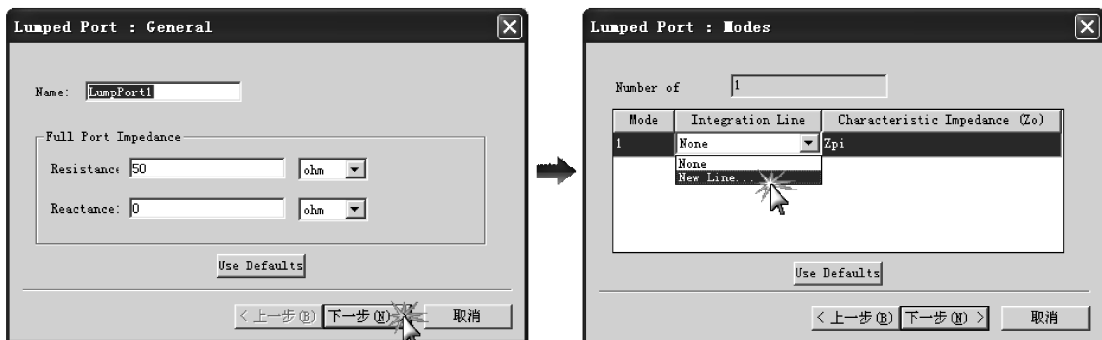


图 1-61 添加集总端口激励

选择“New Line...”命令后，进入积分线绘制模式。首先移动鼠标至 port 平面的下棱边中点并单击左键来确定积分线的起始点，然后将鼠标移动到平面的上棱边中点并单击鼠标左键来确定积分线的终点，如图 1-62 所示。

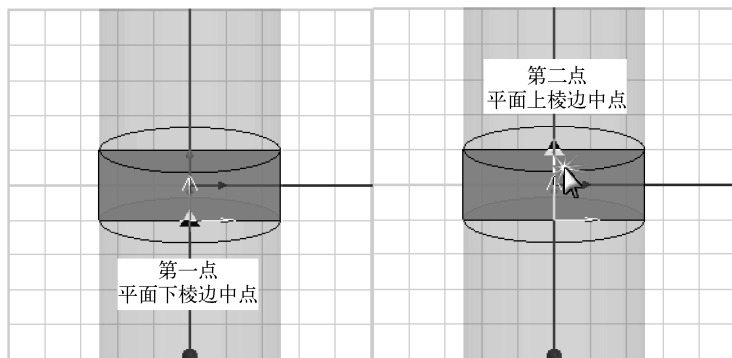


图 1-62 指定积分线的起点和终点

绘制完积分线后单击“模式”对话框中的“下一步”按钮继续，弹出“Lumped Port: Post Processing (后处理)”对话框，保持默认设置，并单击“完成”按钮，如图 1-63 所示。

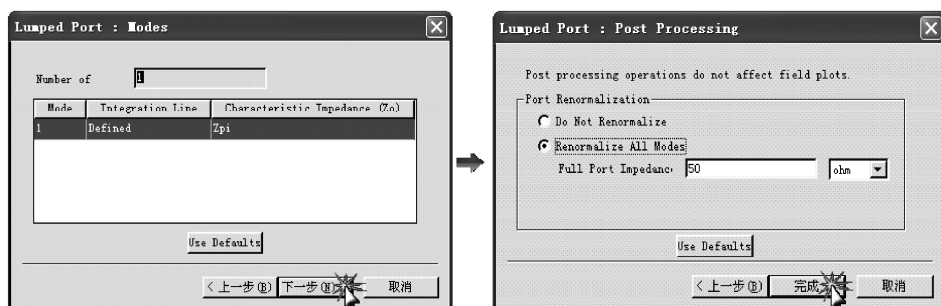


图 1-63 归一化端口阻抗

端口激励设置操作完成后，创建的端口激励 LumpPort1 会显示在工程管理窗口的“Excitations”节点下，点选并查看所创建的端口激励，如图 1-64 所示。

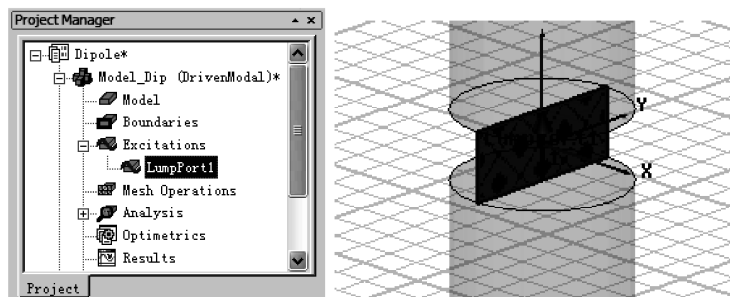



图 1-64 设置完成后的 Lumped Port 端口激励

### 第三步：设置辐射边界表面

#### 1. 创建圆柱体模型

在主菜单栏中选择“Draw→Cylinder”命令或单击工具栏上的按钮，创建一个任意大



小的圆柱体。按照前面介绍的方法对圆柱体属性对话框中的“Attribute”和“Command”选项卡中的内容进行修改，如图 1-65 所示。

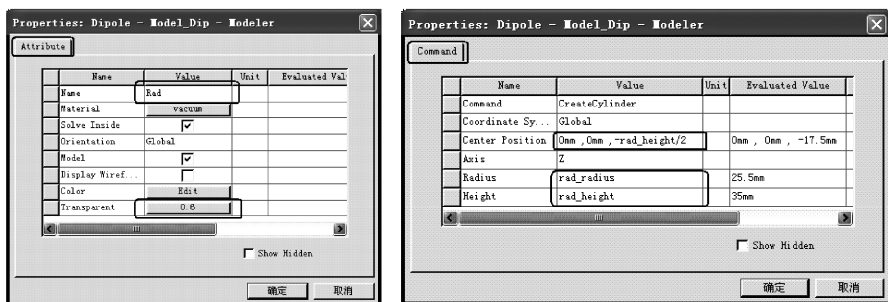


图 1-65 修改后的“Attribute”和“Command”选项卡

修改完成后，再次按下 Ctrl+D 键显示模型。最终创建的圆柱体模型如图 1-66 所示。

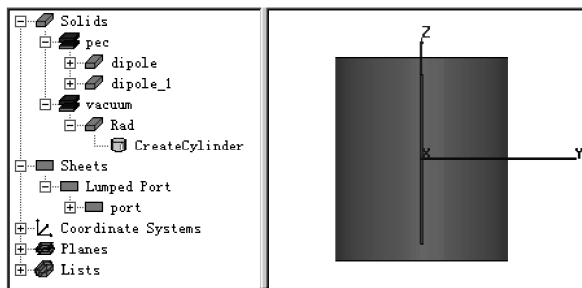


图 1-66 最终创建的圆柱体模型

## 2. 设置辐射边界条件

选中新创建的圆柱体模型，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign boundary→Radiation”命令，弹出“Radiation Boundary（辐射边界条件）”对话框，保持默认设置不变，单击“OK”按钮完成操作，如图 1-67 所示。

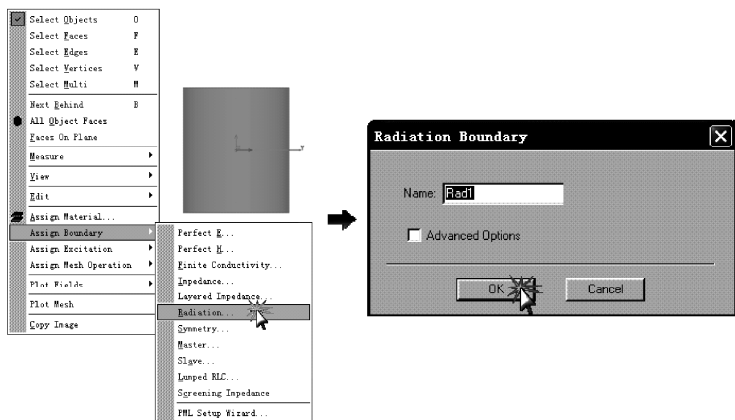


图 1-67 设置辐射边界条件

操作完成后，设置的辐射边界名称将会显示在工程管理窗口中的“Boundaries”节点下，点选并查看设置的辐射边界条件，如图 1-68 所示。

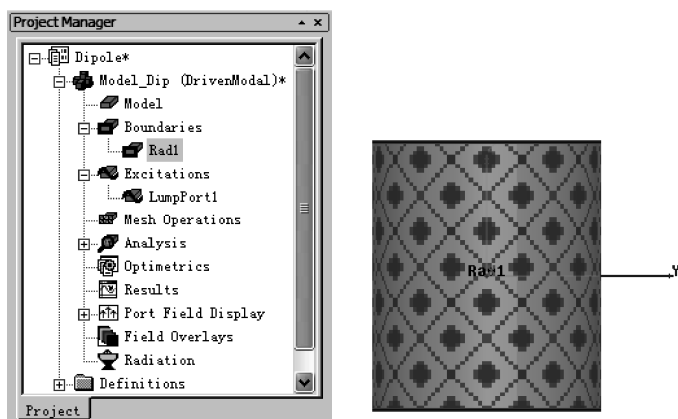


图 1-68 设置完成后的辐射边界条件

### 1.3.3 添加仿真的基本设置

#### 1. 求解设置

选中工程管理窗口中的“Analysis”节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，弹出“Solution Setup”对话框，在“Solution Frequency”栏中输入求解频率为 3GHz，在“Maximum Number of Passes（最大迭代步数）”栏中输入 10，其他选项保持默认设置，单击“确定”按钮退出，操作完成后，名为 Setup1 的求解设置将自动添加到“Analysis”节点下，如图 1-69 所示。

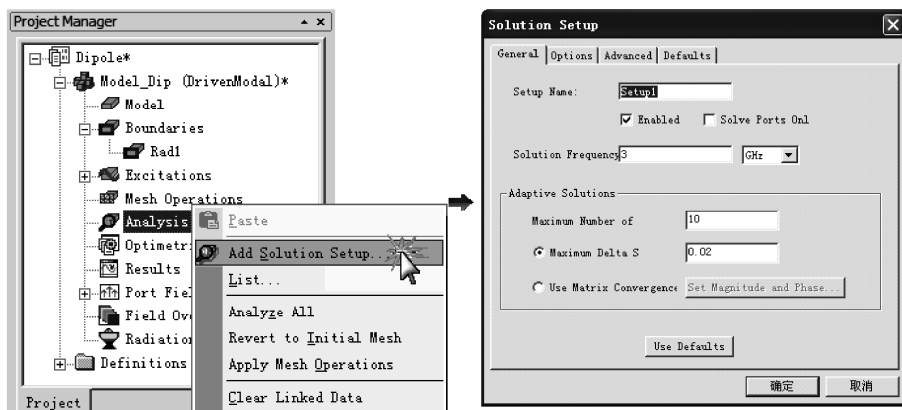


图 1-69 添加仿真求解设置

#### 2. 扫频设置

选中工程管理窗口中的“Analysis”节点下的“Setup1”，单击鼠标右键，在弹出的快

捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，弹出“Edit Sweep”对话框，在该对话框中，选择“Sweep Type (扫频类型)”为 Fast，“Type”为 LinearStep，输入计算频率范围，其中“Start (开始频率)”为 2GHz，“Stop (终止频率)”为 4GHz，“Step Size (频率步长)”为 0.5GHz，单击对话框中间的“Display”按钮，扫描频点将出现在右侧的列表中，单击“OK”按钮退出，如图 1-70 所示。

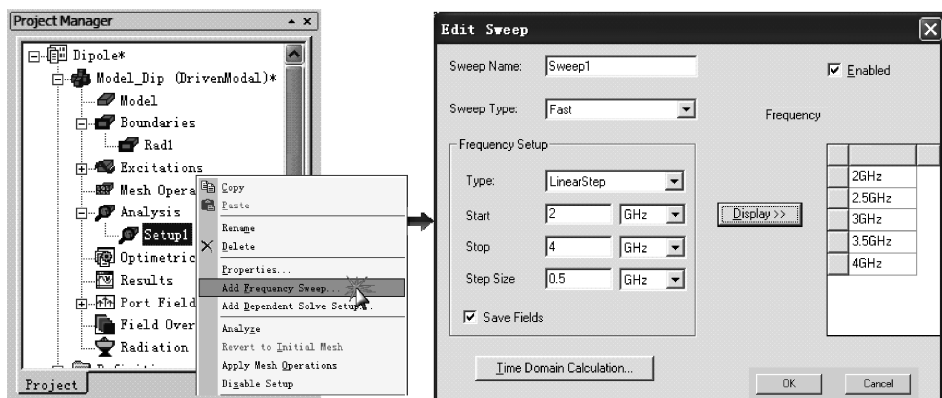


图 1-70 添加扫频设置

### 3. 参数扫描分析设置

选中工程管理窗口中的“Optimetrics”节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add”，然后在其对应的子菜单中选择“Parametric...”命令来打开“Setup Sweep Analysis (参数扫描分析设置)”对话框，如图 1-71 所示。

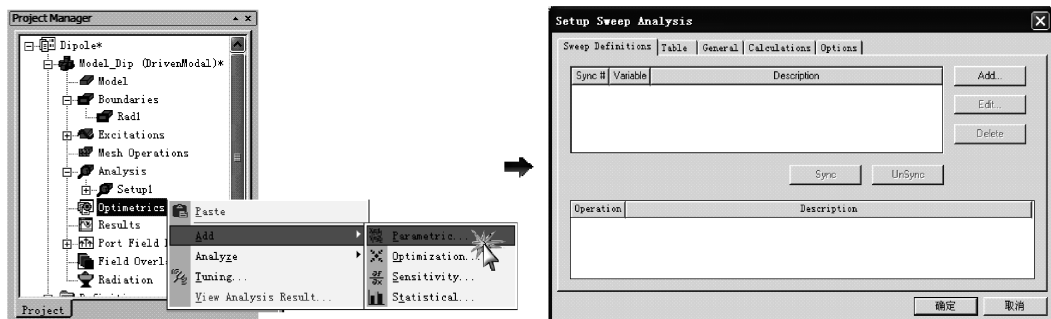


图 1-71 打开参数扫描设置对话框

在弹出的“参数扫描分析设置”对话框中单击右上角的“Add...”按钮来添加扫描变量，再在弹出的“Add/Edit Sweep”对话框中单击“Variable”栏中右侧的倒三角，在下拉菜单中选择参数变量 k，点选扫描类型为“Linear step”，输入起始值为 0.25，终止值为 1，步长为 0.05，单击“Add>>”按钮添加参数扫描，再单击“OK”按钮确认，回到上一级菜单，在“Sweep Definitions”选项卡中可见扫描设置位于下面的列表中。切换到“Options”选项卡，勾选“Save Fields And Mesh”复选框。另外，切换到“Table”选项卡可以查看扫

描参数的具体数值。设置步骤具体如图 1-72 所示。

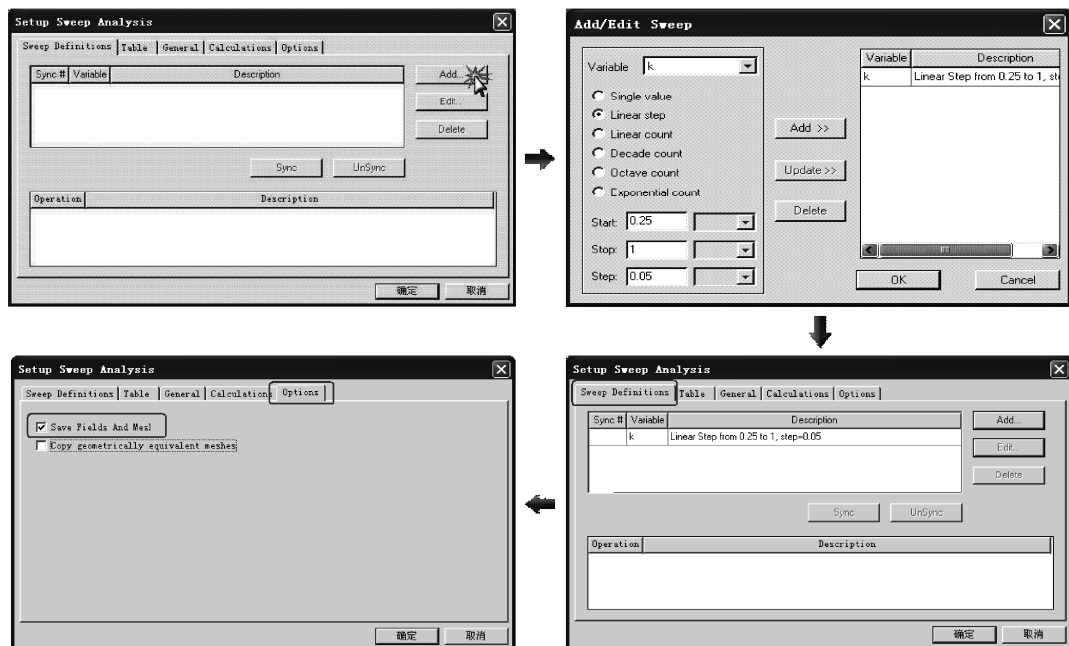


图 1-72 添加参数扫描属性

#### 4. 设置远场辐射球面

选中工程管理窗口中的“Radiation”节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Insert Far Field Setup”，在其对应的子菜单中选择“Infinite Sphere...”命令，打开远场辐射球面设置对话框，指定球坐标系中  $\theta$  和  $\Phi$  的角度变化范围和步长分别为 Phi: Start: 0deg, Stop: 360deg, Step Size: 5deg; Theta: Start: -180deg, Stop: 180deg, Step Size: 5deg, 其他保持默认设置，单击“确定”按钮，如图 1-73 所示。

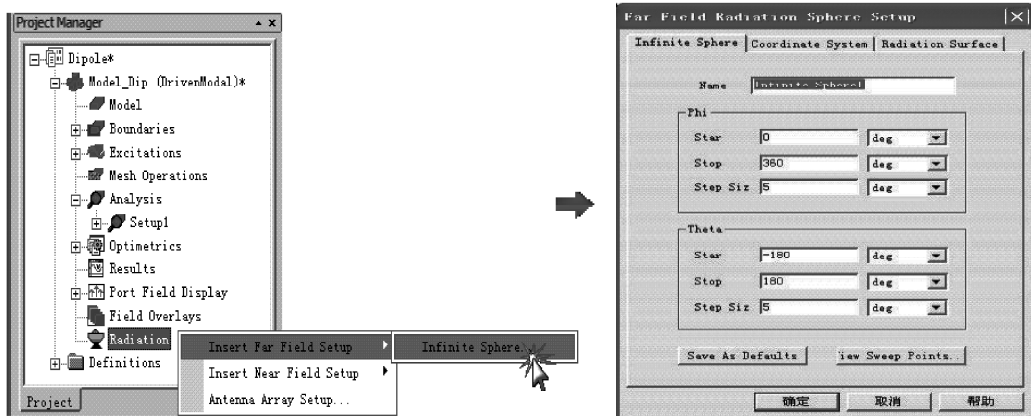


图 1-73 为仿真后处理添加远场辐射球面

### 1.3.4 仿真有效性验证与分析

以上操作完成后，仿真建模工作基本结束，下面对所创建的模型和各项设置进行检查。选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，弹出有效性验证窗口，确认没有错误后，单击“Close”按钮，如图 1-74 所示。

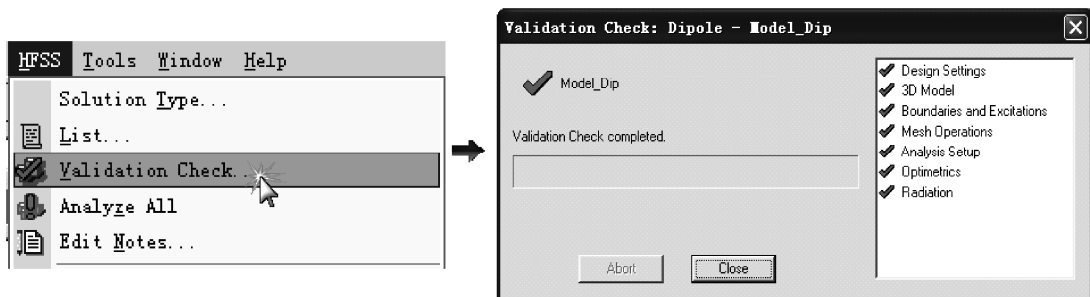


图 1-74 有效性验证窗口

然后选择主菜单栏中的“HFSS→Analyze”命令对仿真模型进行仿真分析。此时，HFSS 窗口中的进程窗口会显示仿真分析的进度；仿真分析完成后，在信息管理窗口中会显示分析已经完成，如图 1-75 和图 1-76 所示。

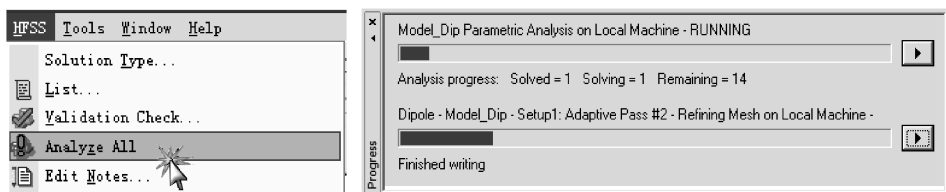


图 1-75 进程窗口

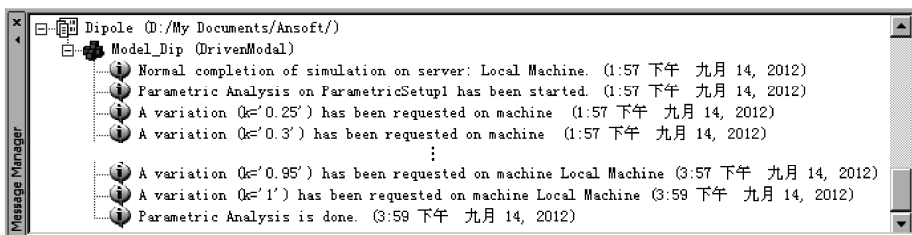


图 1-76 计算完成后的信息管理窗口

### 1.3.5 查看天线远场辐射方向图

#### 1. 创建 3D 辐射方向图

选中工程管理窗口中的“Results”节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择

“Create Far Fields Report→3D Polar Plot” 命令，在弹出的设置对话框的“Trace”选项卡的“Category”栏中选择 Realized Gain，在“Quantity”栏中选择 RealizedGainTotal，在“Function”栏中选择 dB。单击窗口下方的“New Report”按钮生成 3D 辐射方向图，再单击“Close”按钮结束，如图 1-77 所示。

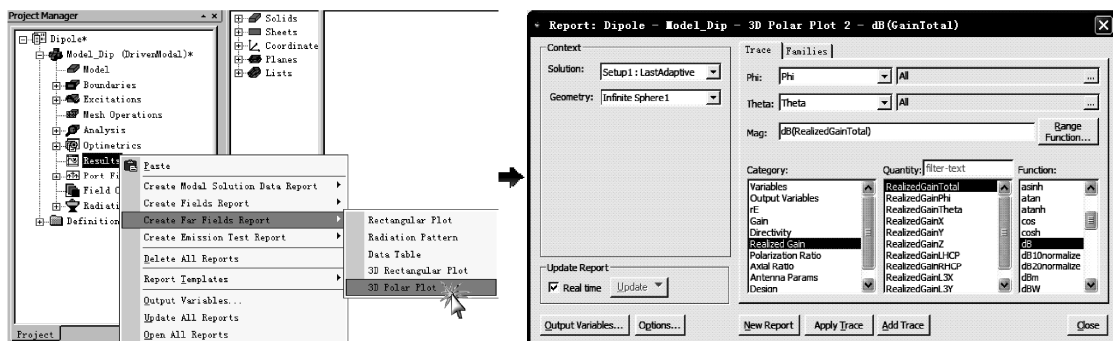


图 1-77 创建三维远场辐射方向图

生成的 3D 远场辐射方向图报告位于工程管理窗口的“Results”节点下，选择并查看，结果如图 1-78 所示。

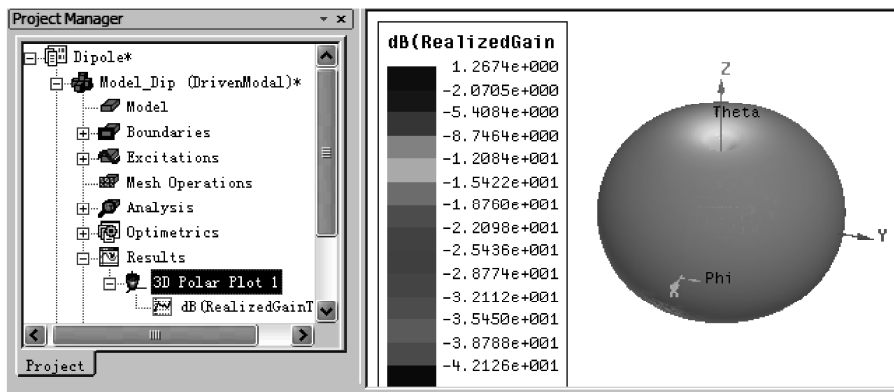


图 1-78 对称偶极子天线的 3D 远场辐射方向图

## 2. 绘制归一化二维远场辐射方向图

(1) 选择辐射参数。选中工程管理窗口中的“Results”节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→Radiation Pattern”命令，在弹出的设置对话框的“Trace”选项卡的“Category”栏中选择 Realized Gain，在“Quantity”栏中选择 RealizedGainTotal，在“Function”栏中选择<none>，此时在“Mag”栏中会显示 Realized GainTotal。

(2) 归一化辐射参数。在“Mag”栏中单击鼠标左键，当出现光标时，将“Mag”栏中的参数表达式修改为  $\text{Realized GainTotal}/\max(\text{Realized GainTotal})$ ，如图 1-79 所示。

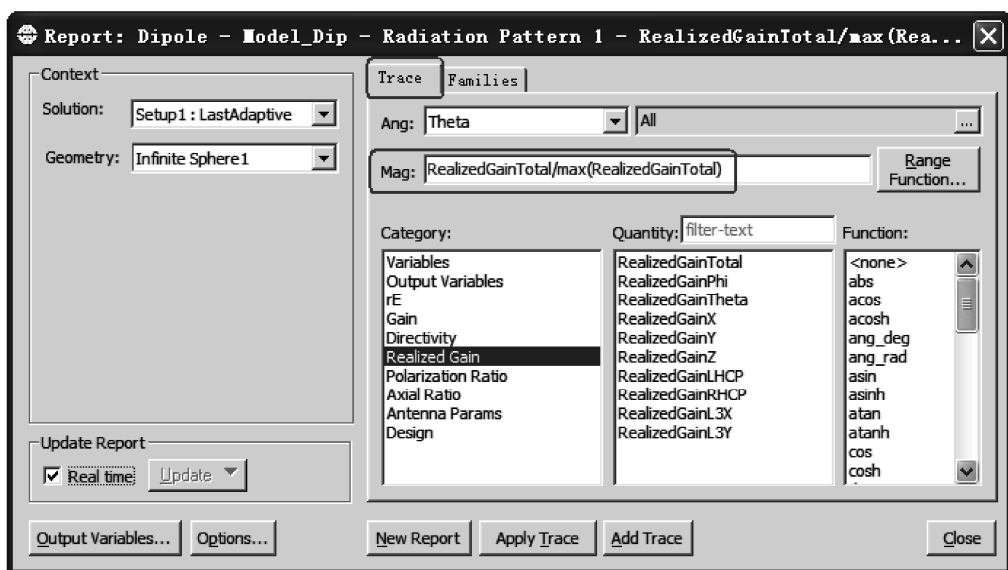


图 1-79 归一化天线远场增益

切换到“Families”选项卡，分别单击“Variable”栏中“Phi”和“k”行后面的...按钮，将数值选为 0deg 和 0.25，此时将要创建的是天线单臂长为  $0.25\lambda$  时， $\text{Phi}=0\text{deg}$  的平面二维远场方向图，如图 1-80 所示。

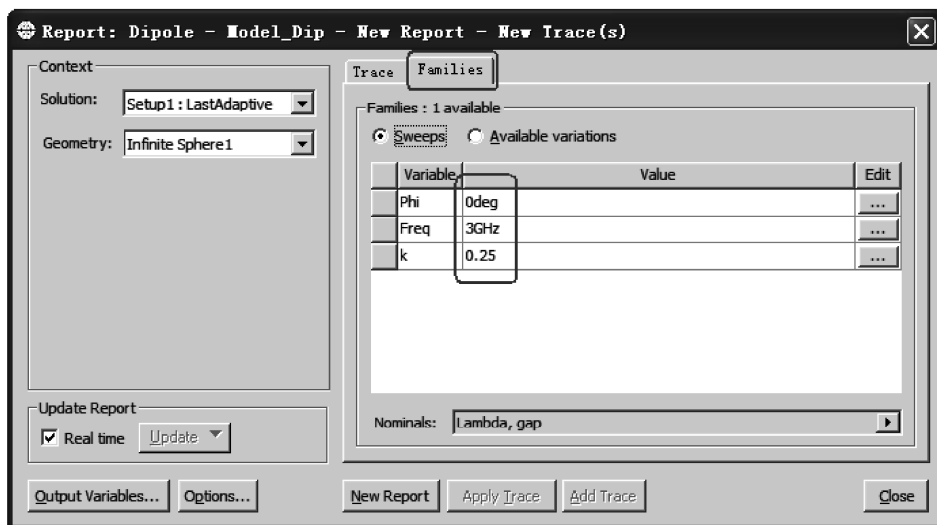


图 1-80 指定远场计算平面和参数变量

单击窗口下方的“New Report”按钮，生成归一化二维远场辐射方向图，再单击“Close”按钮结束。创建的图形如图 1-81 所示。

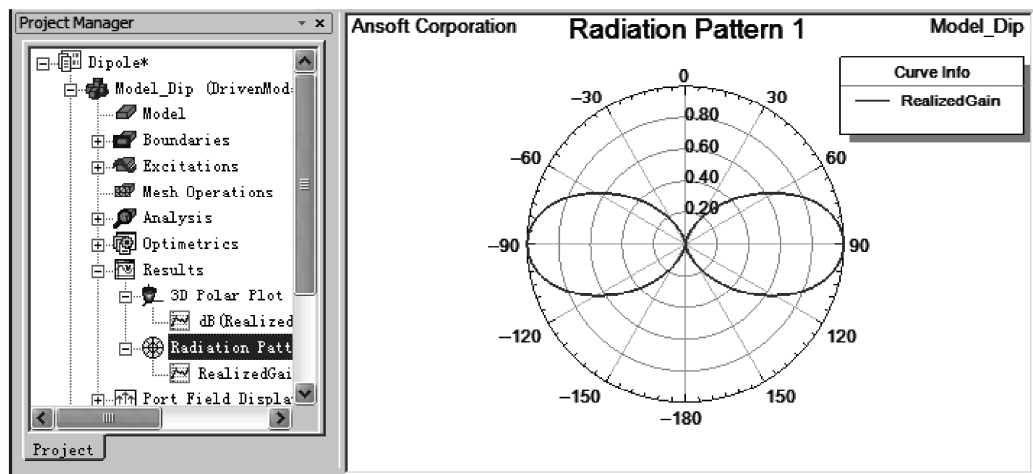


图 1-81 天线的归一化二维远场辐射方向图

### 3. 绘制不同臂长时的方向图

按照以上步骤，在“Families”选项卡中选择不同的天线臂长与波长比  $k$  的数值，然后单击“New Report”按钮，就会在“Results”节点下依次生成不同天线臂长时的归一化二维远场辐射方向图。如图 1-82 所示为臂长与波长比分别为 0.25、0.5、0.6、0.7、0.8、1 时的偶极子天线归一化方向图。

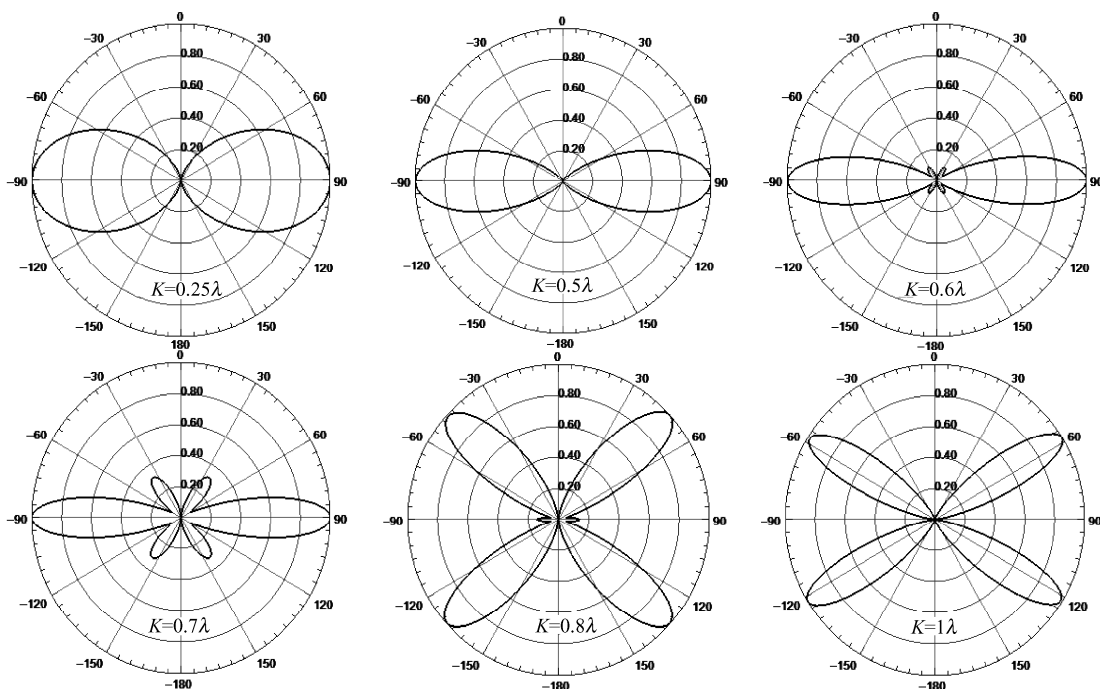


图 1-82 不同臂长时的天线归一化方向图





从图 1-82 中可知：当天线臂长与波长的比值很小时，对称偶极子天线与电流元的方向图很接近，随着比值的增加，方向图变得尖锐；当比值  $k>0.5$  时，方向图除主瓣外，还出现了副瓣；当比值  $k$  为 0.6 左右时，天线的方向性最好；只要比值  $k<0.7$ ，天线辐射的最大方向始终在  $\theta=90^\circ$  方向；当比值  $k>0.7$  后，天线的最大辐射方向偏离  $\theta=90^\circ$  方向；当比值  $k=1$  时， $\theta=90^\circ$  方向成为零陷。

### 1.3.6 保存并退出 HFSS

- (1) 选择主菜单栏中的“File→Save”命令，保存该工程。
- (2) 选择主菜单栏中的“File→Close”命令，关闭工程。
- (3) 选择主菜单栏中的“File→Exit”命令，退出 HFSS 软件。

## 第2章 HFSS 操作界面

HFSS 操作界面是 HFSS 仿真建模、分析和显示对象的区域，采用的是标准 Window 风格的菜单。软件启动后，可以看到一个完整的 HFSS 操作界面，如图 2-1 所示，包括标题栏、主菜单栏、工具栏、工程管理窗口、属性窗口、状态栏、信息管理窗口、模型管理窗口及进程窗口等。

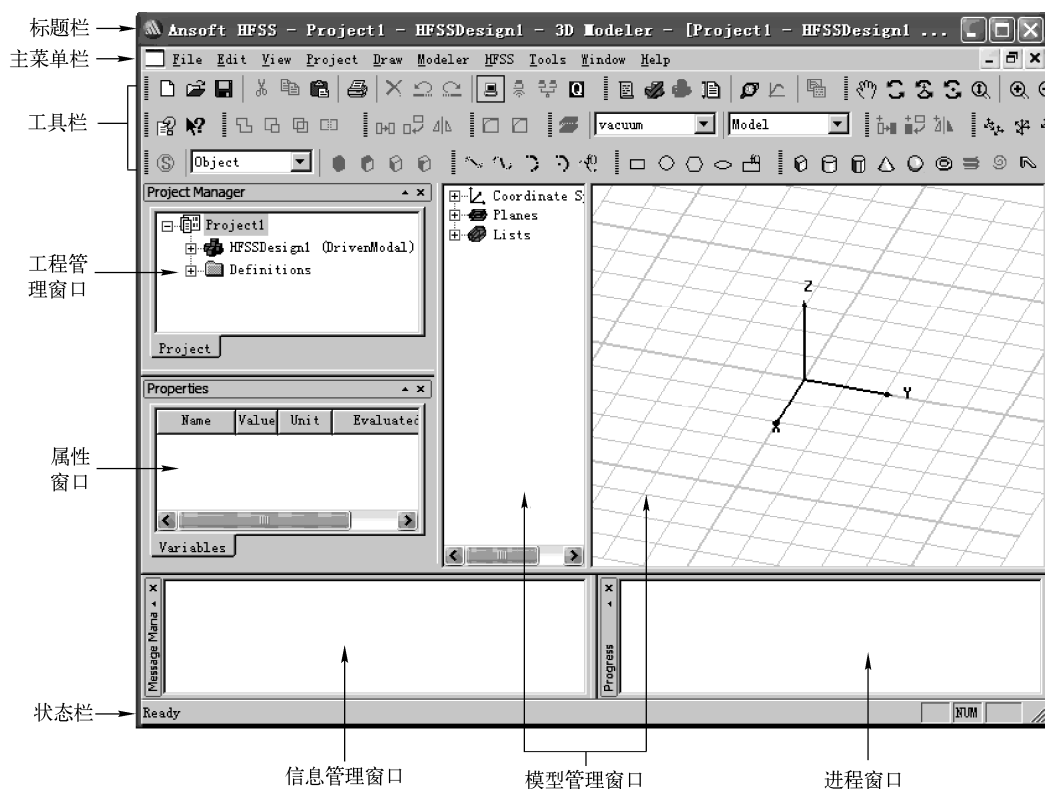


图 2-1 完整的 HFSS 操作界面

### 2.1 标题栏

在 HFSS 操作界面的最上端是标题栏。在标题栏中，显示了系统当前正在运行的应用程序（Ansoft HFSS）和用户正在使用的工程文件（Project1）及正在使用的设计（HFSSDesign1）。第一次启动 HFSS 时，在标题栏中将显示默认的工程和设计名称，仍如图 2-1 所示。



## 2.2 主菜单栏

HFSS 的主菜单栏位于标题栏的下方，如图 2-2 所示。

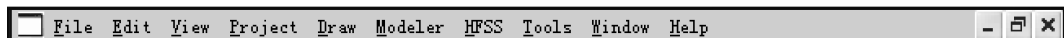


图 2-2 HFSS 的主菜单栏

整个主菜单栏包括 File, Edit, View, Project, Draw, Modeler, HFSS, Tools, Window 及 Help 共 10 个下拉菜单，这些菜单中包含了 HFSS 所有的操作命令。一般来讲，HFSS 下拉菜单中的命令有以下三种类型。

### ① 带有子菜单的命令

这种类型的菜单命令后面带有小三角形。例如，选择菜单栏中的“Edit”命令，指向其下拉菜单中带有小三角形标志的 Arrange（模型变换）命令，系统就会进一步显示出“Arrange”命令子菜单中所包含的子命令，包括 Move（平移）、Rotate（旋转）、Mirror（镜像）和 Offset（偏移）等操作，如图 2-3 所示。

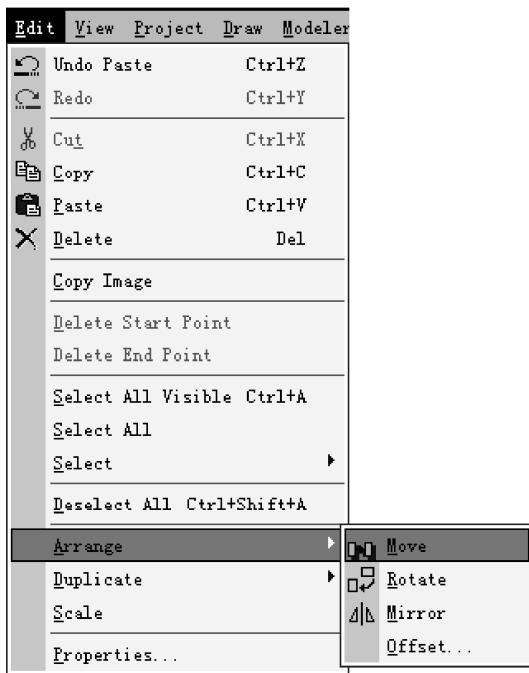


图 2-3 带有子菜单的“Arrange”命令

### ② 打开对话框的命令

这种类型的菜单命令后面带有省略号“...”。例如，选择菜单栏中的“Tools→Customize...”命令，如图 2-4 所示，系统就会打开“定制工具栏”对话框。



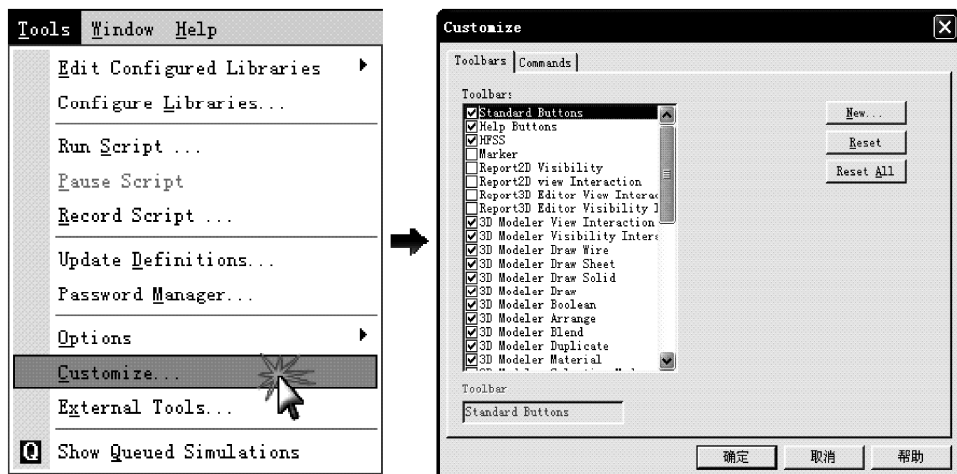


图 2-4 打开“定制工具栏”对话框的“Customize...”命令

### ③ 直接执行操作的命令

这种类型的菜单命令后既不带小三角形，也没有省略号，选择该命令将直接执行相应的操作。例如，选择菜单栏中的“Project→Insert HFSS Design”命令，系统将在工程管理窗口中直接添加新的工程设计。

后面的各节将对这些菜单命令的功能进行详细的介绍。

## 1. File 菜单

File 菜单用于管理 HFSS 文件的新建、打开、保存及打印等操作。用鼠标单击 File 菜单，可以得到如图 2-5 所示的下拉菜单。

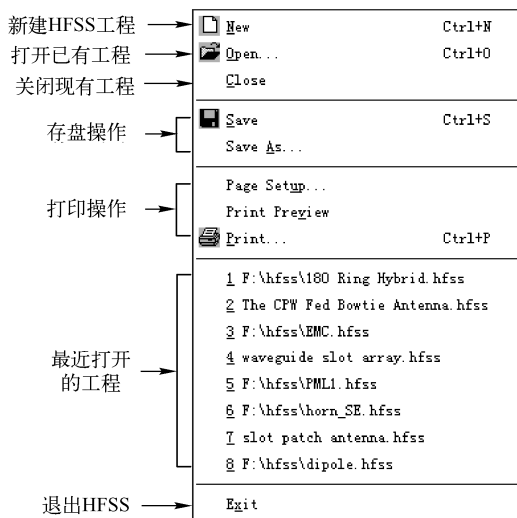


图 2-5 File 的下拉菜单

各操作命令的详细功能及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。



- (1) New: 新建 HFSS 工程。
- (2) Open: 打开一个已有的 HFSS 工程。
- (3) Close: 关闭一个处于激活状态的 HFSS 工程。
- (4) Save (Save As): 存盘操作。保存的工程文件后缀为 “.HFSS”。
- (5) Print: 打印操作。HFSS 支持模型和仿真结果的打印输出。
- (6) Exit: 退出 HFSS。

## 2. Edit 菜单

Edit 菜单主要用于三维模型的编辑和修改。用鼠标选择 Edit 菜单，可以得到如图 2-6 所示的下拉菜单。

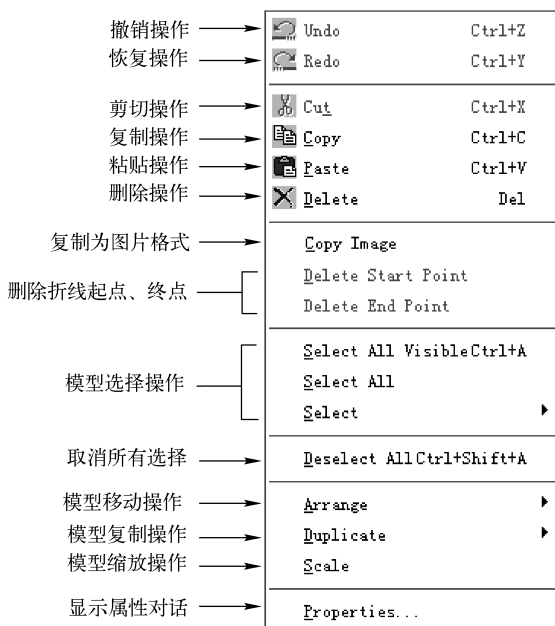


图 2-6 Edit 的下拉菜单

各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。


- (1) Undo: 撤销操作。
- (2) Redo: 恢复操作。
- (3) Cut: 剪切操作。
- (4) Copy: 复制操作。
- (5) Paste: 粘贴操作。
- (6) Delete: 删除操作。
- (7) Copy Image: 复制为图片格式。
- (8) Select All Visible: 选择模型显示窗口中所有可见的模型。
- (9) Select All: 选择模型显示窗口中所有的模型。
- (10) Select: 带有子菜单的选择命令菜单，在其子菜单中可以指定模型的选择方式，包

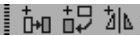




括选择模型的实体，模型的表面、棱边、顶点，或者根据模型名称进行选择等。

(11) Deselect All: 取消对模型的所有选择。

(12)  Arrange: 模型的移动操作，包括平移、旋转、镜像和偏移。

(13)  Duplicate: 模型的特殊复制操作，包括平移复制、旋转复制和镜像复制。

(14) Scale: 模型的缩放操作。通过设置 X、Y、Z 轴的缩放比例，可以对选中的模型进行缩放。不同的轴向可以指定不同的缩放比例。

(15) Properties...: 显示选中模型的属性对话框。

### 3. View 菜单

View 菜单用于控制工作界面中子窗口的显示和隐藏，以及调整三维模型窗口中物体模型的显示方式。用鼠标单击 View 菜单，可以得到如图 2-7 所示的下拉菜单。

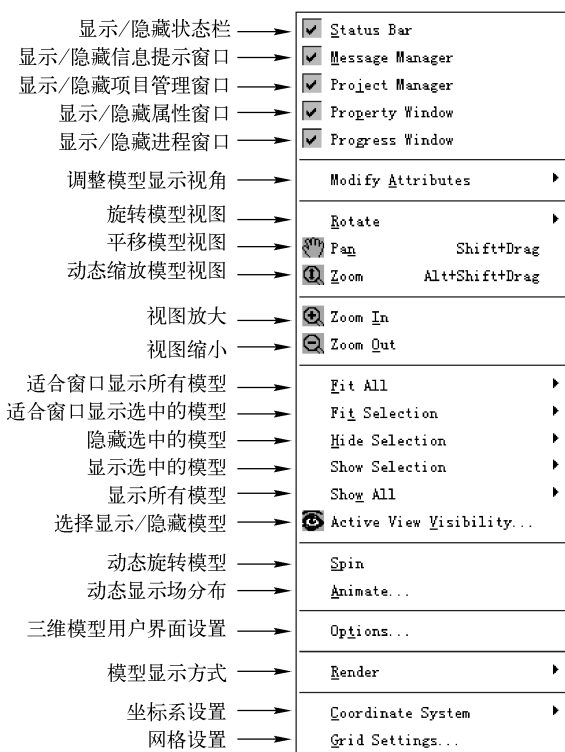



图 2-7 View 的下拉菜单

各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。


(1) Modify Attributes: 设置三维模型显示窗口的视角属性，包括具有透视效果的视角、光照等属性。


(2) Rotate: 模型的旋转命令，包含以下三种旋转模式。


①  Rotate Model Center: 沿模型中心旋转模型。


②  Rotate Screen Center: 沿显示窗口中心旋转模型。


③  Rotate Current Axis: 沿当前坐标原点旋转模型。


(3)  **Pan**: 模型视角平移操作。选择该命令, 在三维模型窗口中拖动鼠标, 可以实现模型及坐标系在窗口中的平移。

(4)  **Zoom**: 模型视角缩放操作。选择该命令, 在三维模型窗口中向上拖动鼠标实现放大显示功能, 向下拖动鼠标实现缩小显示功能。


(5)  **Zoom In**: 框选放大操作。选择该命令, 在模型显示窗口按住鼠标左键, 拉出一个框, 将要放大的部分圈进去, 则会放大显示该框中的内容。可以重复使用该命令, 直到达到想要的显示效果为止。

(6)  **Zoom Out**: 框选缩小操作。选择该命令, 在模型显示窗口按住鼠标左键, 拉出一个框, HFSS 将自动按照该框与整个三维模型显示窗口的比例关系缩小显示模型。


(7)  **Fit All**: 在三维模型显示窗口中以适中的大小显示全部模型。

(8)  **Fit Selection**: 在三维模型显示窗口中以适中的大小显示选中的模型。

(9)  **Hide Selection**: 隐藏选中的模型。

(10)  **Show Selection**: 显示选中的模型。


(11) **Show All**: 显示所有模型, 包括被隐藏的模型。

(12)  **Active View Visibility...**: 在弹出的“可视”对话框中列出了所有的模型清单, 通过勾选和取消勾选来选择相应模型的显示/隐藏。

(13) **Spin**: 选择该命令后, 在三维模型显示窗口拖动鼠标左键指定旋转方向, 则模型将沿着鼠标拖动的方向动态旋转显示。按下 Esc 键停止。

(14) **Animate...**: 设置后处理中的场分布动态显示属性; 可在  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  范围内设置播放的帧数, 以及动态显示的参数变量。

(15) **Options...**: 修改用户界面 (UI) 的默认设置, 包括模型的拖动模式, 选中与非选中模型之间的透明度对比关系, 以及默认旋转模式等。

(16)  **Render**: 选择模型显示模式, 包括实体显示和线性框架显示两种。

(17) **Coordinate System**: 修改当前坐标系的显示属性, 包括大小和隐藏。

(18) **Grid Settings...**: 在弹出的“网格”对话框中可以对模型窗口中的网格参数进行设置。

#### 4. Project 菜单

Project 菜单用于在当前工程中添加设计、管理工程变量、增加工程文档及运行仿真计算。用鼠标单击 Project 菜单, 可以得到如图 2-8 所示的下拉菜单。

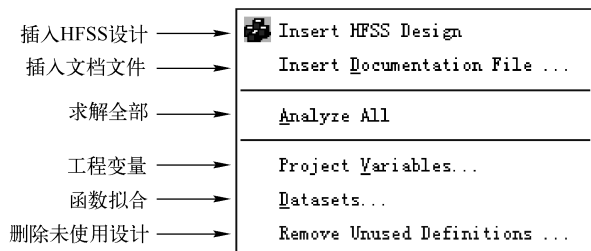




图 2-8 Project 的下拉菜单

各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。

- (1)  Insert HFSS Design: 在当前打开的工程中插入一个新的设计。
- (2) Insert Documentation File...: 在当前打开的工程中插入一个已有的文档文件。
- (3)  Analyze All: 分析当前工程中的所有仿真设计。
- (4) Project Variables...: 在对应的“工程变量”对话框中可以添加或删除工程变量,以便进行参数的建模和优化。



### 特别说明

在此对话框中添加的工程变量对于该工程中的所有设计都有效。工程变量名称前必须冠以 \$ 符号, 如果没有输入 \$ 符号, 系统会自动在每个系统变量前添加该符号。在使用工程变量时必须带有 \$ 符号, 否则会出现错误。同时还要指定变量的量度单位, HFSS 不支持中文变量。

(5) Datasets...: 根据输入的离散点的  $(x, y)$  坐标得出拟合函数, 该函数可用于为材料分配与频率相关的特性参数。

(6) Remove Unused Definitions...: 移除未使用的设计名称。

## 5. Draw 菜单

Draw 菜单主要用于构建一维、二维和三维模型, 以及与建模相关的操作。用鼠标单击 Draw 菜单, 可以得到如图 2-9 所示的下拉菜单。

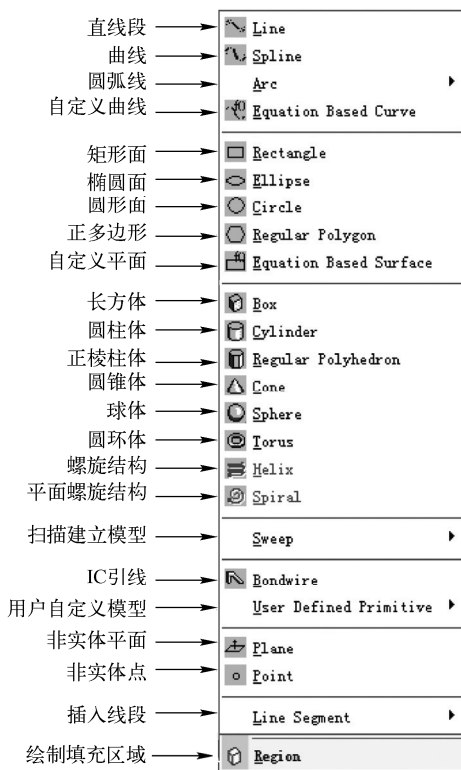























图 2-9 Draw 的下拉菜单





各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。

- (1)  **Line**: 绘制直线段。
- (2)  **Spline**: 绘制样条曲线。
- (3) **Arc**: 绘制圆弧。有以下两种模式。
  - ① : 三点圆弧。选取三个坐标点, 则系统自动生成经过这三个坐标点的圆弧。圆弧始于第一个点, 止于第三个点。
  - ② : 圆心点圆弧。首先指定圆弧圆心点的位置, 然后确定圆弧半径, 同时确定了圆弧的起始点, 最后确定圆弧的终止点。
- (4)  **Equation Based Curve**: 绘制方程曲线。
- (5)  **Rectangle**: 绘制矩形平面。
- (6)  **Ellipse**: 绘制椭圆面。
- (7)  **Circle**: 绘制圆平面。
- (8)  **Regular Polygon**: 绘制多边形平面。
- (9)  **Equation Based Surface**: 绘制方程平面。
- (10)  **Box**: 建立长方体模型。
- (11)  **Cylinder**: 建立圆柱体模型。
- (12)  **Regular Polyhedron**: 建立正棱柱体模型。
- (13)  **Cone**: 建立圆锥体模型。
- (14)  **Sphere**: 建立球体模型。
- (15)  **Torus**: 建立圆环体模型。
- (16)  **Helix**: 建立螺旋体模型。
- (17)  **Spiral**: 绘制平面螺旋结构。
- (18) **Sweep**: 利用已有线、面结构, 通过扫描建立模型, 包括绕坐标轴扫描、沿向量扫描和沿路径扫描三种方式。
- (19)  **Bondwire**: 建立引线模型, 包括 JEDEC 四点、五点引线模型。
- (20) **User Defined Primitive**: 用户自定义模型, 可用 Microsoft Visual C++ Developer Studio 生成的动态链接库文件绘制。
- (21)  **Plane**: 在模型窗口中的问题域绘制非模型横截面, 以便于在后处理中查看该截面的场分布情况。
- (22)  **Point**: 建立一个非模型(不参与计算)的点, 该点可用在后处理中指定计算该点位置的场量。
- (23) **Line Segment**: 插入线段操作。
- (24)  **Region**: 对填充数据、填充百分比等参数进行设置, 用于快速建立辐射边界和其他边界。

## 6. Modeler 菜单

**Modeler** 菜单用于导入、导出模型文件, 以及与建模有关的命令, 如布尔运算、定义模型长度单位、设置模型材料、测量模型尺寸等。用鼠标单击 **Modeler** 菜单, 可以得到如图 2-10 所示的下拉菜单。



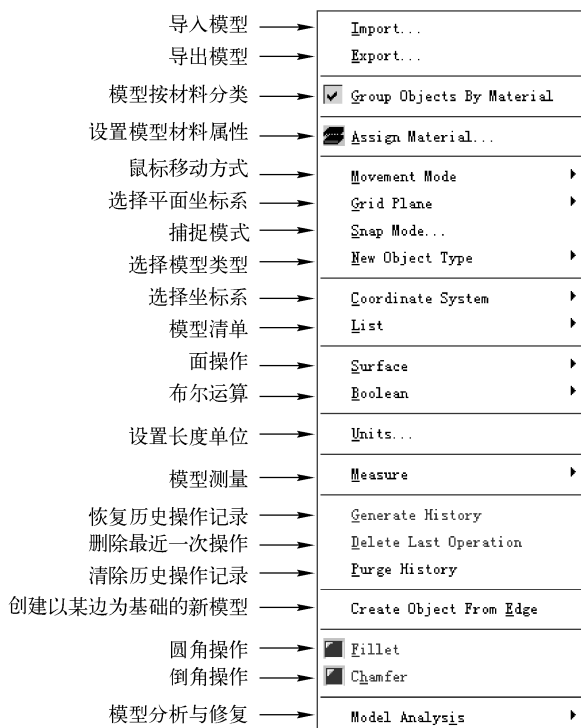


图 2-10 Modeler 的下拉菜单

各操作命令在工具栏中对应的快捷方式按钮及详细的功能说明如下。

(1) Import...: 导入物体模型操作。可以将外部模型（有其他软件创建的模型）导入现有的工程设计中。支持的模型格式参考“HFSS 的文件格式”（1.1.4 节）。

(2) Export...: 导出模型操作。可以将 HFSS 创建的模型以其他格式导出，以便在其他软件中应用。支持的模型格式参考“HFSS 的文件格式”（1.1.4 节）。

(3) Group Objects By Material: 此项勾选与否，决定了模型操作历史树中的模型是否按材料进行分类显示。

(4) Assign Material...: 设置选中物体模型的材料属性。

(5) Movement Mode: 用于设置鼠标在三维模型显示窗口中的移动模式。





(6) Grid Plane: 指定网格平面，即当前模型显示窗口中的主平面，包括 XY 平面、XZ 平面及 YZ 平面。

(7) Snap Mode...: 捕捉模式。在“捕捉模式”对话框中可以选择在建模过程中需要对哪些特殊点进行捕捉。

(8) New Object Type: 选择模型类型，分为模型物体（参与求解计算）和非模型物体（不参与求解计算）。

(9) Coordinate System: 选择全局坐标系或局部坐标系。还可以建立新的局部坐标系，包括相对坐标系（对全局坐标系进行平移、旋转等操作生成的坐标系）和面坐标系（在选中的平面上建立的新坐标系）。



- (10) **List**: 在模型管理窗口的操作历史树中的 List 文件下创建新的模型清单。
- (11) **Surface**: 模型的面操作。
- (12)  **Boolean**: 布尔运算操作。
- (13) **Units...**: 设置创建模型时默认的长度单位。
- (14) **Measure**: 测量操作。通过该操作, 可以测量模型的各种尺寸, 包括模型的位置坐标、长度、面积、体积等。
- (15) **Generate History**: 创建模型的操作历史树, 对线段模型有效。
- (16) **Delete Last Operation**: 删除建模过程中的最后一步命令。例如, 绘制封闭的线段结构时, 软件的最后一步命令是将其填充为面。选择该命令可以将填充为面的操作删除, 只保留封闭的曲线。
- (17) **Purge History**: 删除模型的操作历史树, 对所有模型都有效。
- (18) **Create Object From Edge**: 通过已有边构建模型。
- (19)  **Fillet**: 对选中的棱边进行圆角操作。
- (20)  **Chamfer**: 对选中的棱边进行倒角操作。
- (21)  **Model Analysis**: 模型评估。对模型进行评估, 修复连接错误, 去除建模过程中产生的不必要的细小实体、边线等, 可以避免网格剖分错误。

## 7. HFSS 菜单

HFSS 菜单主要用于边界条件、端口激励的设置及仿真计算等操作, 还可以设置部分软件属性和建模属性, 并对仿真结果进行整理和显示。用鼠标单击 HFSS 菜单, 可以得到如图 2-11 所示的下拉菜单。

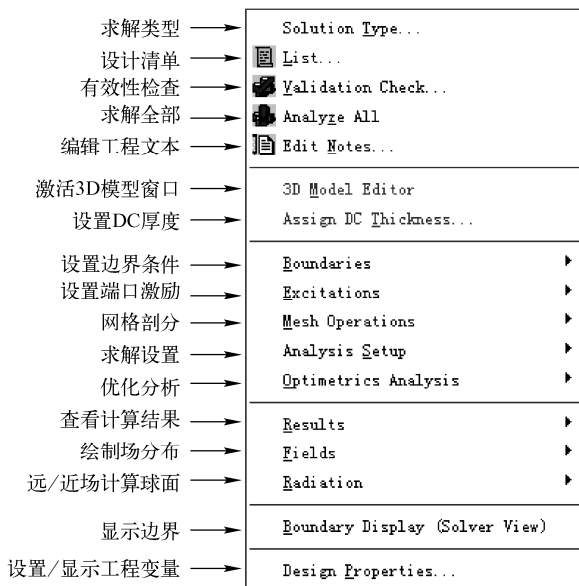


图 2-11 HFSS 的下拉菜单









各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。

(1) **Solution Type**: 设置求解类型。HFSS 提供了三种求解类型, 分别是激励求解 (Driven Modal)、激励终端求解 (Driven Terminal) 和本征模求解 (Eigenmode)。

(2)  **List**: 显示设计清单。

(3)  **Validation Check...**: 工程的有效性验证。在进行仿真分析之前, 该功能用于对 HFSS 仿真设计的正确性和有效性进行验证, 提示用户错误或遗漏的操作。只有验证的所有项目选项前端都显示符号时, 对仿真设计的求解才是有效的, 否则不能进行仿真分析, 或者不能得出准确的仿真结果。

(4)  **Analyze All**: 分析工程中所有的设计。

(5)  **Edit Notes...**: 对工程文本文件进行编辑, 用于记录用户感兴趣的信息, 可以用做工程的技术说明文档, 或仿真建模的备忘录。



(6) **3D Model Editor**: 用于激活处于隐藏状态的三维模型窗口。当然, 激活三维模型窗口还可以通过双击工程管理窗口的工程树中对应的设计名来完成。






(7) **Assign DC Thickness**: 指定 DC 厚度, 用来调整薄导体的直流电阻。

(8) **Boundaries**: 包含所有与边界条件相关的命令。

(9) **Excitations**: 包含所有与激励条件相关的命令。

(10) **Mesh Operations**: 网格设置操作。

(11) **Analysis Setup**: 求解设置, 用于指定求解频率, 扫频参数, 以及完成网格剖分计算。

(12) **Optimetrics Analysis**: 优化分析设置。其中为添加优化变量; 为新建优化分析; 为敏感性分析; 为统计分析; 为调协分析及优化结果的显示。

(13) **Results**: 显示计算结果与创建结果报告。

(14) **Fields**: 后处理中与计算和显示模型场量有关的命令。

(15) **Radiation**: 为辐射问题后处理设置远场或近场计算球面, 以方便查看辐射特性和场分布; 另外, 还可以进行天线阵相关参数的设置。

(16) **Boundary Display (Solver View)**: 显示已有边界条件。

(17) **Design Properties...**: 添加和显示工程中某个具体设计的参数变量。注意, 该命令与 Project 菜单中的“Project Variables...”工程变量命令的区别为: “Project Variables...”命令设置的是工程变量, 参数名称之前必须带有 \$ 字样, 工程变量对该工程中的所有设计都有效; 而“Design Properties”命令设置的是设计变量, 参数名称之前不需要带 \$ 字样, 用户可以根据实际需要指定参数名称, 设计变量只在其对应某个具体的工程设计时才有效。


## 8. Tools 菜单

Tool 菜单用于修改当前物体材料的属性, 运行和记录脚本文件等操作。用鼠标单击 Tool 菜单, 可以得到如图 2-12 所示的下拉菜单。



图 2-12 Tools 的下拉菜单

各操作命令的详细功能说明及在工具栏中对应的快捷方式按钮如下。

- (1) Edit Configured Libraries: 编辑当前设计的库文件。
- (2) Configure Libraries...: 配置当前设计的库文件。
- (3) Run Script...: 运行 Ansoft 宏脚本文件。
- (4) Pause Script: 暂停运行的 Ansoft 宏脚本文件。
- (5) Record Script...: 选择该命令可以将执行的操作录制成 Ansoft 宏脚本文件。
- (6) Update Definitions...: 更新库文件定义。
- (7) Password Manager...: 对指定的库文件设置访问密码, 从而对指定的资源进行加密。
- (8) Options: 设置当前设计工作环境, 一般使用默认设置。
- (9) Customize...: 打开“工具栏定制”对话框。
- (10) External Tools: 添加 Ansoft 公司开发的一些小工具、扩展库和脚本程序, 以方便软件的工程设计。
- (11)  Show Queued Simulations: 显示和调整仿真分析计划。针对使用“Analyze All (分析全部)”命令, 在打开的仿真分析计划列表中, 可实现仿真计划的删减和顺序调整。

## 9. Window 菜单

Window 菜单用于 3D 模型窗口的管理操作。用鼠标单击 Window 菜单, 可以得到如图 2-13 所示的下拉菜单。



图 2-13 Window 的下拉菜单





各操作命令的详细功能说明如下。

- (1) New Window: 新建一个三维模型窗口显示当前设计的模型。
- (2) Cascade: 以层叠方式显示所有打开的三维模型窗口。
- (3) Tile Horizontally: 以水平排列方式显示所有打开的三维模型窗口。
- (4) Tile Vertically: 以垂直排列方式显示所有打开的三维模型窗口。
- (5) Close All: 关闭所有打开的三维模型窗口。关闭后可以通过“HFSS→3D Modeler Editor”命令重新打开三维模型窗口, 或者用鼠标双击工程管理窗口中对应的工程设计。

## 10. Help 菜单

Help 菜单主要用于访问 HFSS 自带的帮助文档系统, 该菜单中还包含 HFSS 版本信息、License 及 Ansoft 的官方网站。用鼠标单击 Help 菜单, 可以得到如图 2-14 所示的下拉菜单。

用户可以在 Help 菜单中选择“On Context”命令或在窗口上部的工具栏中单击按钮(该按钮为用户快速查看某一窗口或按钮的帮助文件提供了一个快捷方式), 还可以使用键盘快捷组合键(Shift+F1 键), 当鼠标变为时, 单击要查询的窗口或按钮图标, 便可以快速进入该功能对应的 Help 文件页面。

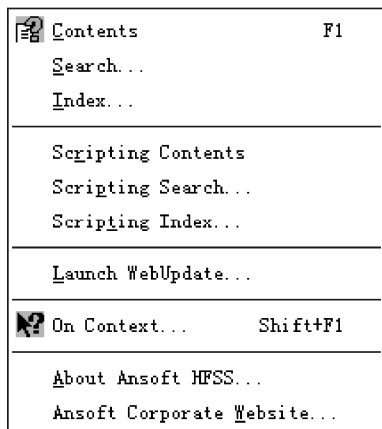


图 2-14 Help 的下拉菜单

## 2.3 工具栏

工具栏是一组按钮工具的集合, HFSS 的工具栏提供了常用操作的快捷运行按钮, 这些快捷按钮对应的命令都包含在 HFSS 主菜单栏的各个下拉菜单中。把鼠标移到某个按钮上, 稍停片刻即会在按钮的一侧显示按钮对应的命令名, 同时在操作界面最下面的状态栏中, 会显示与该命令有关的功能说明, 单击该按钮就可以执行相应的操作命令了。

### 1. 定制工具栏

HFSS 提供了 43 种不同的工具栏, 在默认情况下, 工具栏中已经显示了大部分常用的快捷方式按钮, 如图 2-15 所示。

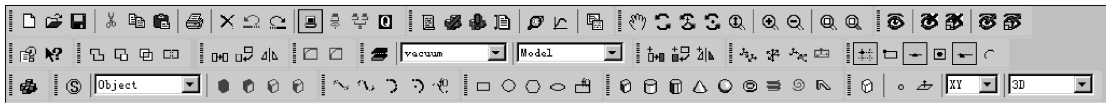


图 2-15 HFSS 的工具栏

用户还可以根据自己的需要自行添加、删除工具栏, 以及更改工具栏的排列方式。定制工具栏有以下两种方式。

- (1) 在主菜单栏中选择 Tools 菜单, 在弹出的下拉菜单中选择“Customize...”命令, 弹出如图 2-16 所示的对话框, 在该对话框的“Toolbars”选项中通过勾选/取消勾选某工具栏

前面的复选框来显示/隐藏对应的工具栏；在“Commands”选项中可以查看不同工具栏中对应显示的图标按钮。重新定制生效后，可以通过单击对话框中的 **Reset All** 按钮来恢复 HFSS 默认的工具栏设置。

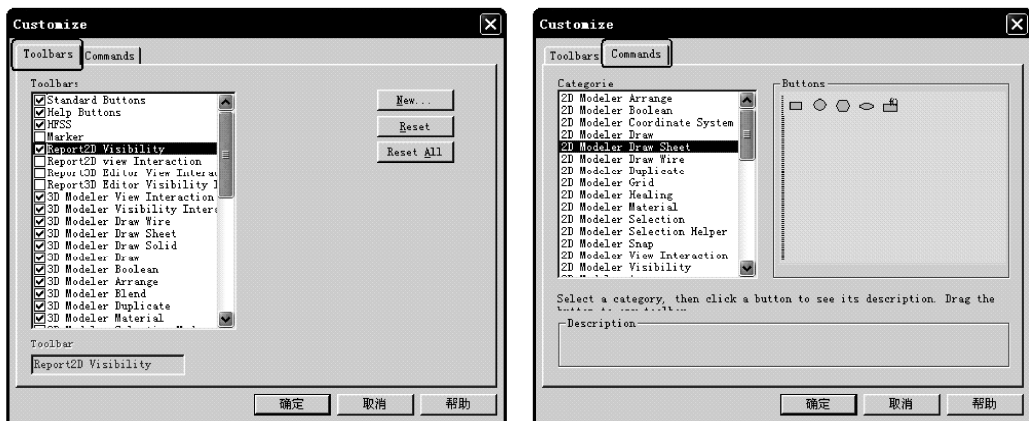


图 2-16 “工具栏定制”对话框

(2) 在窗口工具栏的空白处单击鼠标右键，在弹出的工具栏分组列表中选择显示/隐藏对应的工具栏。



## 2. 工具栏的“固定”、“浮动”与关闭

可以利用鼠标拖动工具栏最前面的“||”图标来调整工具栏的位置和顺序。工具栏还可以在模型显示窗口区域“浮动”显示，如图 2-17 (c) 所示，此时将显示该工具栏的标题。可以通过单击窗口右上角的 **×** 按钮来关闭对应的工具栏窗口。还可以拖动“浮动”工具栏到显示窗口的边界或其他位置，使它成为“固定”工具栏，此时该工具栏的标题隐藏。



图 2-17 “HFSS 工具栏”的“固定”、“浮动”与关闭

## 2.4 工程管理窗口

如图 2-18 所示，工程管理窗口以工程树的形式显示了所有打开的 HFSS 工程，包括打开的工程名称、设计名称。单击工程名称前端的  和  按钮可以展开和收起工程树，以查看工程中的设计，而且每个设计在工程管理窗口中都有一个工程树，如图 2-19 所示，图中显示了当前设计所需的设置和操作命令。单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择相应的命令，可以完成对模型结构、材料属性、边界条件、端口激励、网格划分、优化和求解参数的设定和查看，以及对仿真结果的显示等操作。各项的具体功能可参考主菜单栏的相应命令。

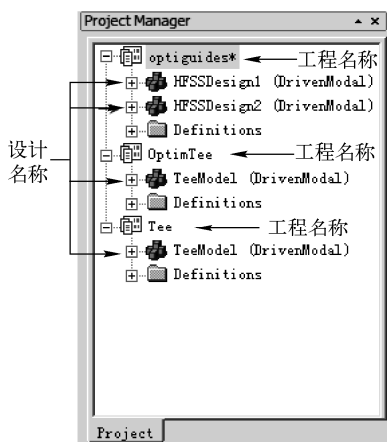


图 2-18 显示多个打开工程的工程管理窗口



图 2-19 工程管理窗口中的工程树

工程管理窗口的显示和关闭可以通过选择主菜单栏中的“View→Project Manager”命令来实现。

## 2.5 属性窗口

在默认情况下，属性窗口位于工程管理窗口的下面，用于显示选中物体的名称、坐标、材料等属性，还可以对物体的名称、颜色和透明度进行编辑和修改。同时，该窗口还可以显示工程中包含的变量属性：如果用鼠标选中工程项目的名称，则属性窗口将显示用户通过主菜单栏中的“Project→Project Variables...”命令创建的工程变量属性；如果用鼠标选中工程中的具体的设计名称，则属性窗口将显示通过主菜单栏中的“HFSS→Design properties...”命令创建的或在模型的建立过程中随机添加的设计变量属性。当然，无论是哪种变量，都可以通过该属性窗口对变量参数进行修改和调整。

属性窗口的显示和关闭可以通过选择主菜单栏中的“View→Property Window”命令来实现。



## 2.6 信息管理窗口

信息管理窗口的默认位置在整个 HFSS 工作界面的左下角，用于显示与工程设计相关的各项信息，如工程设计错误信息、求解进度信息等，如图 2-20 所示。在信息管理窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中可以实现信息的清除与复制。

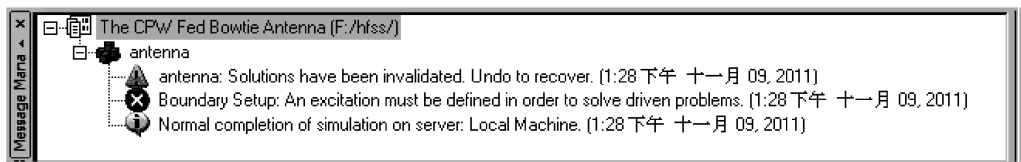


图 2-20 信息管理窗口

信息管理窗口的显示/隐藏可以通过选择主菜单栏中的“View→Message Manager”命令来实现。

## 2.7 进程窗口

在默认环境下，进程窗口位于 HFSS 工作界面的右下角，用于显示当前设计的仿真分析进度，如图 2-21 所示。

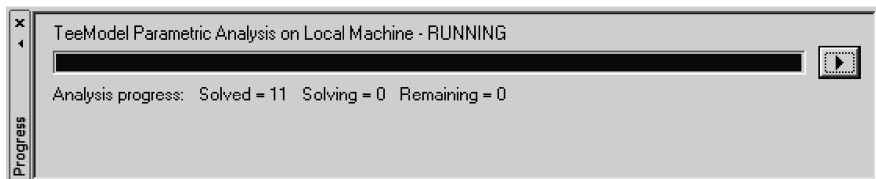


图 2-21 进程窗口

在仿真分析过程中，用户可以单击进度条右侧的按钮“▶”来终止分析进程。进程窗口的显示/隐藏可以通过选择主菜单栏中的“View→Progress Window”命令来实现。

## 2.8 模型管理窗口

模型管理窗口是创建、编辑和显示物体模型的区域，位于工程管理窗口的右侧，由模型操作历史树和模型编辑显示区两部分组成。

### 1. 模型操作历史树

如图 2-22 所示，模型操作历史树中列出了当前模型在建模过程中的操作步骤。

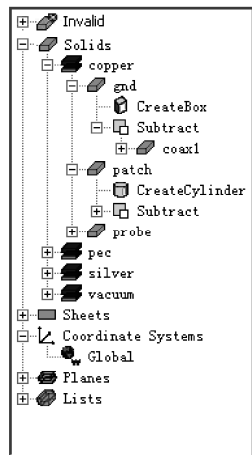


图 2-22 模型操作历史树



在“Solids”上单击鼠标右键，可以查看模型是否按照材料进行排序（默认为按照材料进行排序）。当模型按照材料进行排序时，二维和三维模型被分开列出，窗口中各列表的内容如下。

（1）Invalid：列表中显示所有不可用物体。分析求解之前要处理掉，否则进行工程的有效性检查时，3D 模型项会报错。

（2）Solids：列表中显示所有模型中的物体及在建模过程中每个物体执行的操作记录。用户可以通过删除相应操作记录来取消某一历史操作，但是要严格按照逆序进行，不能跳过某些操作而取消之前的操作。

（3）Sheets：列表中显示所有平面结构物体。在默认情况下，该列表按照边界条件的设置进行排列。

（4）Coordinate Systems：列表中显示当前模型中所有的坐标系，包括主坐标系及用户创建的相对坐标系，用户可以在此列表中选择适当的坐标系进行建模。

（5）Planes：列表中显示所有二维坐标平面。在默认情况下，二维坐标平面分为 xy 面，xz 面和 yz 面。

## 2. 模型编辑显示区

模型编辑显示区是对物体模型进行编辑和显示的区域，位于模型管理窗口的右侧，是一个三维坐标窗口，如图 2-23 所示。

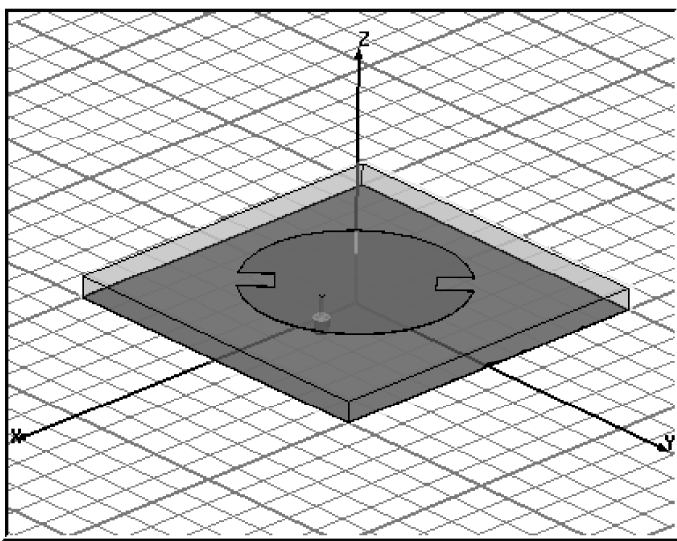


图 2-23 模型编辑显示区

在模型编辑显示区中，通常使用栅格（Grid）来辅助建模和定位。用户可以通过选择主菜单栏中的“View→Grid Settings”命令来设置栅格显示的大小、类型和风格。对应的“Grid Spacing（栅格设置）”对话框如图 2-24 所示。

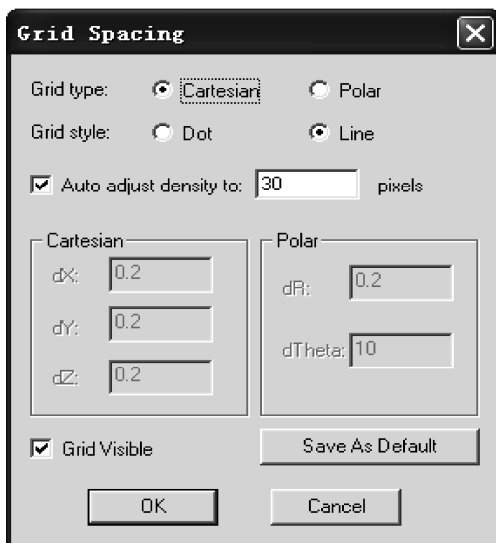


图 2-24 “Grid Spacing (栅格设置)”对话框

该对话框中各项的含义如下。

(1) Grid type: 栅格类型。用户可以根据需要选择 Cartesian (笛卡儿坐标系), 也就是直角坐标系或 Polar (极坐标系)。

(2) Grid style: 栅格风格, 包含 (Dot) 点状栅格和 (Line) 线状栅格两种不同形式的栅格类型。

(3) Auto adjust density to: 栅格间距复选框。勾选该复选框后, 系统将按照默认值自动控制栅格间距; 如果取消对该复选框的勾选, 下面的灰色文本框将被激活, 可根据用户选择的坐标系不同, 分别激活左侧的笛卡儿坐标系选项和右侧的极坐标系选项, 从而手动调整栅格间距。当在模型编辑显示区中对模型进行放大和缩小操作时, 栅格的大小也会随之进行相应的调整。

(4) Grid Visible: 栅格显示复选框。勾选该复选框则模型编辑显示区中显示栅格, 不勾选则不显示栅格。

模型管理窗口的显示/隐藏操作可以通过选择主菜单栏中的“HFSS → 3D Modeler Editor”命令来完成。

## 2.9 状态栏

状态栏 (如图 2-25 所示) 位于 HFSS 操作界面的最底部, 用于显示当前操作的相关信息, 通常用于对鼠标停留处对应的命令进行注释说明。在创建物体模型或对模型进行移动、旋转等操作时, 它还可以用来输入具体的位置坐标和偏移量。



图 2-25 状态栏

当状态栏处于输入状态时，包含 X、Y、Z 坐标输入框，以及两个下拉菜单，其中在 **Absolut** 下拉菜单中可以选择输入点是绝对坐标值还是相对坐标值；在 **Cartesian** 下拉菜单中可以选择输入点的坐标系类型，包括直角坐标、圆柱坐标和球坐标。最后一个框中显示的是模型的尺寸单位。



#### 特别说明

输入坐标时，一旦在状态栏输入区设定了第一个点的坐标，输入坐标将默认设置为相对坐标。在相关联的模式下，坐标不再是绝对坐标（从工作坐标系的原点开始算起），而是相对于前一个输入点的相对坐标。

状态栏中的坐标输入区允许使用公式作为输入坐标位置的值，如  $2*5$ ， $2+3+4$ ， $2*\cos(\pi/4)$ ，其中三角函数是以弧度为单位的；但是坐标输入区不能使用变量。

对于坐标系，系统在默认环境下会在模型显示窗口中显示当前工作坐标系，用于定位和构建模型。可以通过主菜单栏中的“View→Coordinate system”命令来对坐标系的大小和显示/隐藏等属性进行操作。

## 第3章 HFSS 仿真建模的基本操作

在对具体电磁问题进行 HFSS 分析计算时，首先要做的就是针对该问题建立适当的仿真模型。本章从基本实体模型的建立讲起，详细讲述如何利用 HFSS 的建模工具构建三维仿真模型，包括基本模型的创建、复杂模型的创建，以及与建模相关的操作。

### 3.1 坐标系与工作平面

在进行仿真建模的过程中，坐标系的选择和工作平面的使用是必不可少的，HFSS 的坐标系包括全局坐标系（Global Coordinate System）、相对坐标系（Relative Coordinator System）和面坐标系（Face Coordinate System）三种，下面分别进行介绍。

#### 3.1.1 全局坐标系

全局坐标系是系统默认的坐标系。全局坐标系被认为是一个绝对的参考系。在默认情况下，全局坐标系为全局笛卡儿坐标系。同时，HFSS 也预定义了除笛卡儿坐标系以外的柱坐标系和球坐标系。因此，对于空间任意一点，都可以用笛卡儿坐标、圆柱坐标或球面坐标来表示该点的坐标位置，而且不管哪种坐标系，都需要使用三个参数来表示该点的正确位置，如图 3-1 所示。

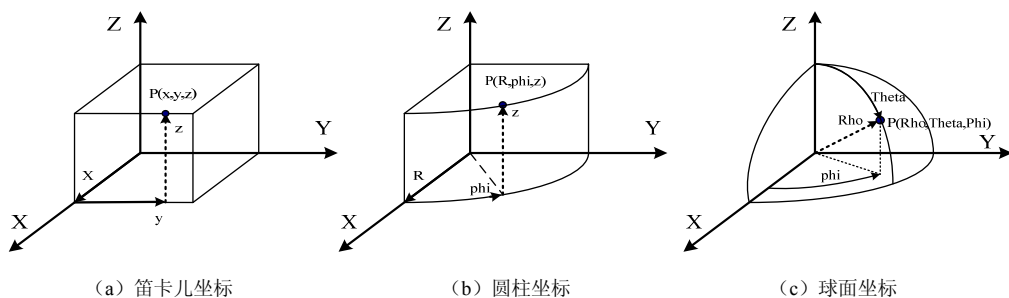
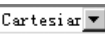


图 3-1 全局坐标系

三种全局坐标系的切换可以通过选择状态栏中的  的下拉菜单选项来实现，如图 3-2 所示。

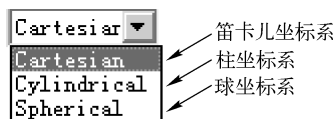





图 3-2 状态栏中的坐标系下拉菜单

### 3.1.2 相对坐标系

相对坐标系是用户在当前坐标系的基础上自己创建的坐标系。当前坐标系既可以是全局坐标系，也可以是之前创建的局部坐标系。HFSS 提供了三种创建相对坐标系的方法：选择主菜单栏中的“Modeler→Coordinate System→Relative CS→Create”子菜单中的“Offset”、“Rotate”和“Both”命令来创建新的相对坐标系；或者单击工具栏中对应的快捷方式按钮、、进行相应的操作。

**Offset（偏移）：**将当前坐标系平移一定距离形成新的坐标系。选择该命令后，在三维模型窗口中想要创建的新坐标系原点处单击鼠标左键或在状态栏中输入新坐标系原点坐标 X、Y、Z，按 Enter 键确认，原坐标系便平移到该点，进而形成一个新的相对坐标系。

**Rotate（旋转）：**将当前坐标系旋转一定角度形成新的坐标系。选择该命令后，首先在三维模型窗口中指定 X 轴旋转后的位置，然后移动鼠标选择 Z 轴的指向（只有两种选择），当出现需要的指向时单击鼠标左键确认，即创建了一个 Rotate 方式的相对坐标系。

**Both（偏移并旋转）：**将当前坐标系偏移一定距离又旋转一定角度形成新的坐标系。选择该命令后，第一步是指定新坐标系的原点坐标；第二步是指定新坐标系的 X 轴方向；第三步则是确认 Z 轴的指向。

当相对坐标系创建完成后，新定义的相对坐标系会自动添加到模型操作历史树中的“Coordinator”节点下，系统自动生成的坐标系名称依次为 RelativeCSn ( $n=1,2,\dots$ )。同时，系统会自动将新生成的坐标系指定为当前工作坐标系。单击“Coordinator”节点下的坐标系名称，可以指定对应的坐标系为当前工作坐标系（Working Coordinator System），在当前工作坐标系状态的坐标系名称的左下侧将显示一个红色的“W”标识。

如果对新创建的坐标系不满意，除了可以将其删掉，创建新的坐标系外，还可以对现有相对坐标系进行编辑以得到所需的坐标系。编辑或更改相对坐标系的方法是：首先在操作历史树中的“Coordinator”节点下选择需要修改的相对坐标系；选中后，在操作界面左下方的“Properties（属性）”对话框（如图 3-3 所示）中对相对坐标系的相关属性参数进行编辑，可以修改相对坐标系的名称、位置和方向。

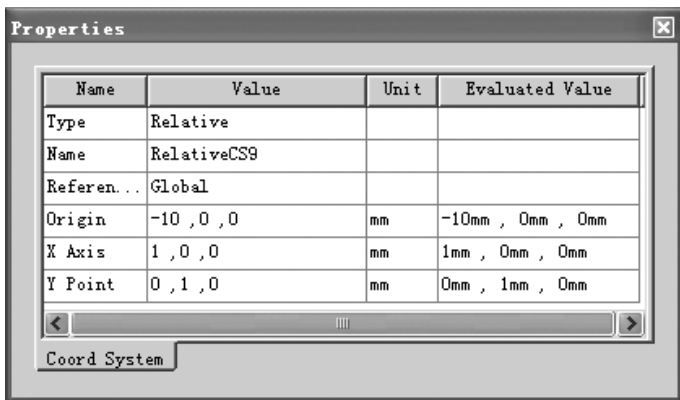



图 3-3 相对坐标系的“Properties（属性）”对话框



### 3.1.3 面坐标系

为了进一步方便用户建模，HFSS 提供了一种在物体模型表面创建局部坐标系的功能。如图 3-4 所示，创建面坐标系的具体步骤为：

- (1) 选择要创建坐标系的物体模型表面；
- (2) 选择主菜单栏中的“Modeler→Coordinate System→Relative CS→Create→Face CS”命令，或者单击工具栏中的快捷方式按钮；
- (3) 在选中的物体模型表面单击鼠标左键，指定面坐标系的坐标原点；
- (4) 移动光标选择面坐标系的 X 轴指向，单击鼠标左键确认，完成创建操作。

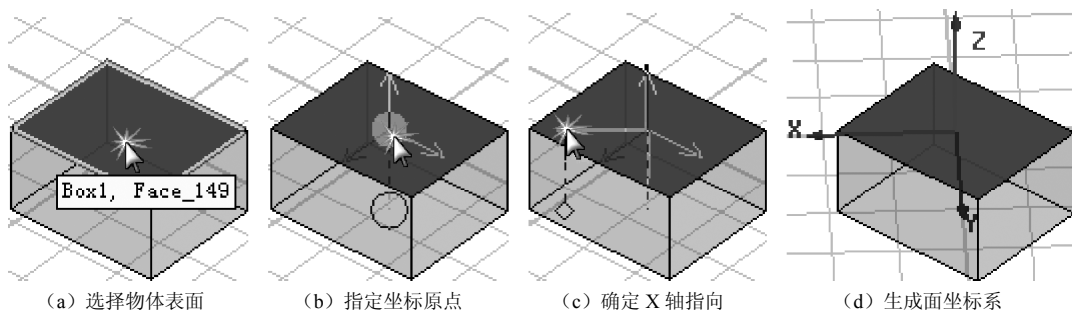


图 3-4 面坐标系的创建过程

由于面坐标系是在原有的物体模型表面基础上创建的，所以当物体模型表面位置发生变化时，面坐标系的位置也会随之改变，从而保证了在面坐标系下创建的模型能够保持与所在平面物体模型固定的位置关系。其效果如图 3-5 所示。

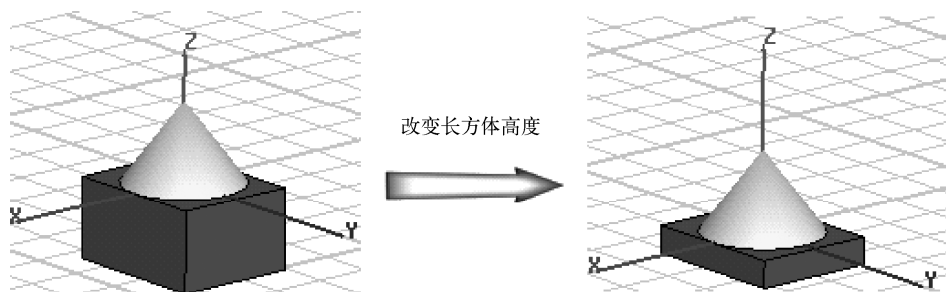


图 3-5 面坐标系物体随模型表面位置变化


由图 3-5 可知，当面坐标系所在平面位置发生变化，即长方体高度发生变化时，在面坐标系下创建的圆锥模型也随之改变，其与长方体的位置关系及自身尺寸则保持不变。

### 3.1.4 工作平面

对于 HFSS 的工作平面，读者可以将其简化理解为栅格所在的平面，它是创建几何模型的参考平面。工作平面为绘图和建模提供了一个起始平面，从而方便了建模。同一时刻只能





定义一个工作平面，进入程序后，默认的工作平面为全局笛卡儿坐标系的 X-Y 平面，它表示当前三维模型窗口中的绘图平面。用户可以通过主菜单栏中的“Modeler→Grid Plane”命令选择 X-Y 平面、X-Z 平面、Y-Z 平面来方便地进行绘图和建模，还可以在工具栏的三维绘图按钮的  下拉菜单中选择不同的栅格平面作为建模的工作平面。

选择不同的工作平面对于建模有很大的帮助作用，如在默认的 X-Y 平面下创建一个以 X-Y 平面为底的圆锥模型很简单，但是要建立一个底面在 Y-Z 平面上的圆锥就很困难了，此时选择 Y-Z 平面作为工作平面，问题便会迎刃而解。如图 3-6 所示为在不同的工作平面下创建的底面直径为 100mm，高 50mm 的圆锥模型。

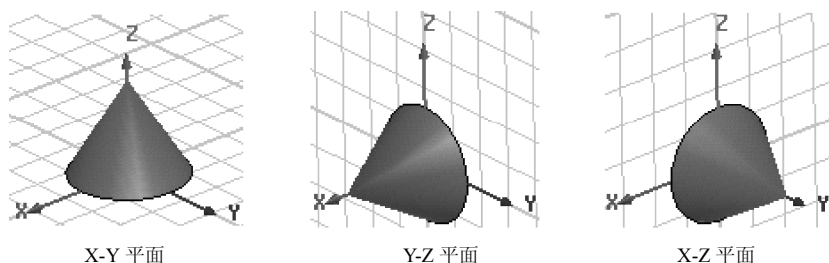


图 3-6 在不同工作平面下创建的圆锥模型

工作平面的常用操作有显示工作平面、移动工作平面、旋转工作平面、定义工作平面等，由于这些操作都会引起其中物体模型的相应变化，所以在模型的操作章节再对它们一并进行介绍。更多关于工作平面的问题，请读者参考 HFSS 自带的帮助文档。

## 3.2 HFSS 中的变量

要想创建 HFSS 参数的仿真模型，就要使用变量来设置模型的尺寸、材料属性等参数。同时，如果需要使用 HFSS 的参数扫描和优化设计等功能，也必须用到变量这个概念。下面将详细介绍 HFSS 中的变量的类型、定义，以及如何添加和使用变量。

### 3.2.1 变量类型

HFSS 中定义了两种类型的变量：一种是工程变量；另一种是设计变量。下面分别介绍这两种变量的区别和应用。

**Project Variables (工程变量)：**工程变量对于该工程中的所有设计都有效。在创建工程变量时，名称前必须冠以 \$ 符号，如果没有输入 \$ 符号，系统会自动在每个工程变量前添加该符号，同时还要指定变量的量度单位。HFSS 不支持中文变量。

**Design Properties (设计变量)：**设计变量与工程变量一样，可以用来表示设计参数，不同的就是设计变量只在对应的仿真设计中有效，不像工程变量那样适用于工程中的所有设计。设计变量不需要加 \$ 前缀，而且也不像工程变量那样需要提前定义后才能使用，设计变量可以在建模操作时一并定义和使用。

完整的变量定义包含变量名和变量值两部分。变量名以字母开头，可以由字母、数字和





下划线“\_”组成。需要注意的是，有些字母/数字的组合为 HFSS 默认定义的常数变量和函数，用户设置的变量名不能使用这些名称。HFSS 中的变量不区分大小写。如果在添加变量时无意中与某一个系统变量重复，软件会做出提示让用户更换名称。

变量值既可以是数值、数学表达式或函数表达式，也可以是数组、矩阵或行列式。对于数值变量，HFSS 支持使用科学计数法；对于函数表达式，必须符合 HFSS 默认规范；数学表达式则需要注意运算符的优先级。

每个变量在定义时都必须赋予一个初始值，如果同时指定了变量的单位，在建模中使用该变量时，就不再需要重新指定单位了。另外，由于 HFSS 的参数扫描、优化设计、调谐分析和灵敏度计算时不支持复数，所以复数变量不能用于这些分析中。

HFSS 内置了部分常用的常数变量以方便用户调用，部分常数变量如表 3-1 所示。

表 3-1 HFSS 默认的常数变量（部分）

变 量 名	变 量 值	单 位	描 述
pi	3.14159265		圆周率
boltz	$1.3806503 \times 10^{-23}$	J/k	波尔兹曼常数
c0	299792458	m/s	真空中的光速
elecq	$8.854187817 \times 10^{-12}$	C	电子电荷
eta	376.730313416	$\Omega$	真空特征阻抗
e0	$3.85 \times 10^{-12}$	F/m	真空介电常数
U0	$1.256637061 \times 10^{-66}$	H/m	真空磁导率
G0	9.80665	$\text{m/s}^2$	重力加速度
sabs0	-273.15	$^{\circ}\text{C}$	绝对零度
mMathE	2.718281828		自然对数的底
planck	$6.6260775 \times 10^{-34}$		普朗克常数

同时，HFSS 还提供了常用的数学函数，用户可以在需要时方便地调用它们，其中部分函数如表 3-2 所示。

表 3-2 HFSS 中常用的函数（部分）

函 数 名	函 数 描 述	函 数 名	函 数 描 述
abs	取绝对值	asin	反正弦函数
acos	反余弦函数	asinh	反正弦双曲函数
acosh	反余弦双曲函数	atan	反正切函数
ang_deg	复数的相位角（值域：+/-180）	atanh	反正切双曲函数
ang_rad	弧度角	avg	取两个参数的平均值
avgabs	取平均值的绝对值	ln	自然对数
cos	余弦函数	log10	以 10 为基底的对数
cosh	双曲余弦函数	mag	取复数的模



续表

函 数 名	函 数 描 述	函 数 名	函 数 描 述
dB(x)	$20 \times \log_{10}( x )$	max	取最大值
dBm(x)	$10 \times \log_{10}( x ) + 30$	min	取最小值
dBW(x)	$10 \times \log_{10}( x )$	re	取复数的实部
db10normalize	$10 \times \log[\text{normalize}(\text{mag}(x))]$	sin	正弦函数
db20normalize	$20 \times \log[\text{normalize}(\text{mag}(x))]$	sinh	双曲正弦函数
even	偶数返回 1，奇数返回 0	sqrt	平方根
exp	幂指数 ( $e^x$ )	tan	正切函数
im	取虚数部分	tanh	双曲正切函数
int	取整函数	y0	零阶第二类贝塞尔函数
j0	零阶第一类贝塞尔函数	y1	1 阶第二类贝塞尔函数
j1	1 阶第一类贝塞尔函数		

HFSS 中常用的运算符如表 3-3 所示。

表 3-3 HFSS 中常用的运算符

运 算 符	名 称	优 先 级
()	括号	1
!	取反	2
^	求幂	3
-	负号	4
*, /	乘号、除号	5
+, -	加号、减号	6
=, !=, >, <, >=, <=	等于、不等于、大于、小于、大于等于、小于等于	7
&&,	逻辑与、逻辑或	8

### 3.2.2 工程变量的添加、删除和使用

要想为新创建的工程添加工程变量，可以选择主菜单栏中的“Project → Project Variables...”命令，或者在工程管理窗口中选中工程项目名称，然后单击鼠标右键，选择弹出菜单中的“Project Variables...”命令。通过以上操作会打开工程变量的“Properties（属性）”对话框，如图 3-7 所示。

图 3-7 中的“Project Variables”选项卡的主要功能包括添加新变量（编辑变量名称、赋予初始值、指定单位、添加描述语言等）、删除已有变量，以及通过选择 Optimization、Tuning、Sensitivity 和 Statistics 单选按钮来设置变量是否用于优化设计、调谐分析、灵敏度分析和统计分析等操作；“Intrinsic Variables”选项卡中列出了 HFSS 系统预定义的常用变量；“Constants”选项卡中列出了 HFSS 系统默认的常数变量。用户可以浏览后两项的内

容，通过选择使用系统默认的变量来进行参数建模，同时也可避免添加的变量与系统变量重复。



图 3-7 工程变量的“Properties（属性）”对话框

下面首先来看一下为参数建模而添加和编辑变量的步骤。首先单击图 3-7 所示对话框左下角的“Add...”按钮，系统会弹出“Add Property”对话框，如图 3-8 所示。

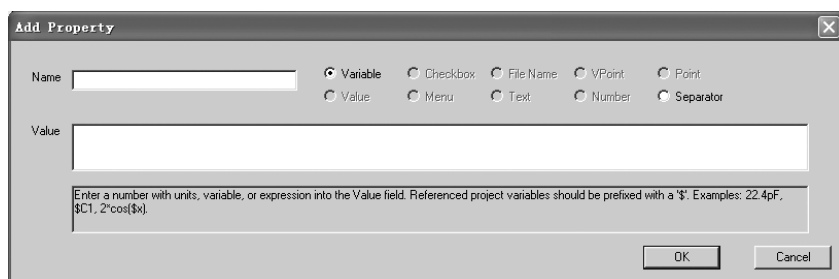


图 3-8 “Add Property”对话框

然后在“Add Property”对话框中的“Name”项中输入想要添加的新变量名称，名称前既可以加 \$ 符号，也可以不加，因为软件会自动为变量加上 \$ 符号；在“Value”项中设置变量的初始值，该初始值既可以是具体数据，也可以是数学表达式或函数表达式。输入完成后单击“OK”按钮确认，新变量会自动添加到变量列表中。

为了方便使用和区别不同变量，用户可以为新变量添加描述语言：在图 3-7 所示的工程变量列表中，找到对应变量的“Description”项，单击鼠标，出现光标后便可输入对应变量的描述性语言，此处支持中文输入。如果要删除某一个已经定义的变量，只需要在工程变量列表中选中该变量，然后单击左下角的“Remove”按钮即可。

使用工程变量，在建模操作时，只需要在模型的“属性”对话框中用设置的变量来替换相应的参数量即可。例如，创建矩形波导参数模型时，在波导的“属性”对话框中的波导长边、短边和长度项中输入相应的工程变量名，即可使相应的波导模型尺寸参数化，如图 3-9 所示。

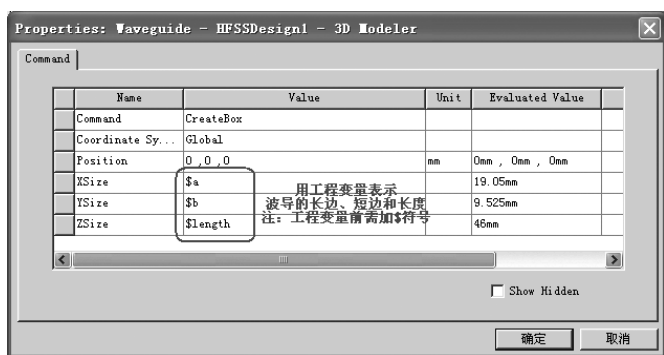


图 3-9 工程变量在矩形波导参数建模中的应用

### 3.2.3 设计变量的添加、删除和使用

设计变量也可以像工程变量一样提前进行定义。选择“HFSS→Design Properties...”命令，或者选中工程管理窗口中的设计名称，在对应的右键菜单中选择“Design Properties...”命令，执行完以上命令后弹出设计变量的“编辑”对话框，然后便可以添加和编辑设计变量了。新设计变量的添加与编辑与工程变量的操作步骤一样，只是不需要在变量名称前加 \$ 符号。

另外，设计变量可以在使用的同时进行定义，如使用参数建模创建一个圆柱体，可以在圆柱体的“属性”对话框中直接输入想要使用的设计变量名称：将圆柱体的半径设为 radi；将高度设为 high，如图 3-10 所示。当输入之前未定义的变量时，HFSS 会弹出“Add Variable (添加变量)”对话框，让用户来完成刚输入的变量的定义操作，包括赋予变量初始值和单位。

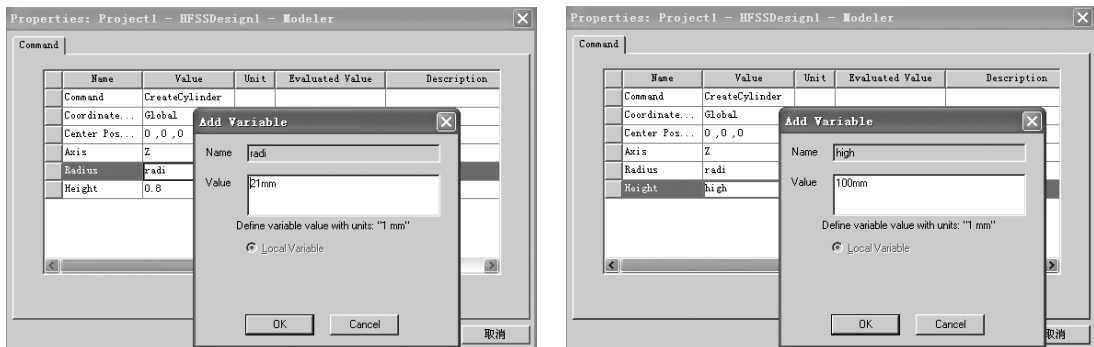


图 3-10 建模的同时定义设计变量

参数建模的好处是不仅为优化分析做准备，还可以方便对模型尺寸等属性进行检查核对，对模型的相关属性进行修改和调整。因此，建议用户在正式开始建模操作前，先对模型的相关参数变量进行梳理，列出一个参数变量列表，在具体建模操作时，再对照表格进行相应的设置。



## 注意

当我们单击工程树中的设计节点时，所有的变量都会显示在属性窗口中，用户可以通过属性窗口对参数变量进行修改，而不需要分别打开每个物体模型的属性进行修改。另外，变量之间，变量与有效的数值之间可进行数学运算，并可将其算式直接输入属性窗口。

### 3.3 鼠标的移动与捕捉

#### 3.3.1 鼠标的移动模式

在默认条件下，进入 HFSS 程序后，鼠标可以在三维模型显示窗口中的三维空间任意移动，但是在进行建模、测量等操作时，有时候需要鼠标进行特定的移动，如限制鼠标只能沿固定轴移动或只能在某一平面移动等。虽然手动也可以实现这些操作，但是操作起来很有难度，而且也不能够保证准确的精度，因此 HFSS 提供了一系列命令来实现鼠标的特殊移动。

从主菜单栏的“Modeler→Movement Mode”命令中可以看到，HFSS 中的鼠标移动模式包括 3D、In Plane、Out Of Plane、Along X Axis、Along Y Axis、Along Z Axis 共六种。也可以通过单击工具栏中的快捷方式按钮，在弹出的下拉菜单中选择鼠标的移动模式，如图 3-11 所示。

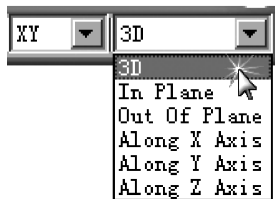


图 3-11 鼠标移动模式选择菜单

每种命令对应的鼠标光标的移动方式如下。


- (1) 3D: 在三维模型窗口中自由移动。
- (2) In Plane: 限定在上一个点所在的工作平面内移动。
- (3) Out Of Plane: 限定在上一个点所在的并且平行于当前工作平面的平面内移动。
- (4) Along X Axis: 只能沿着 X 轴方向移动。
- (5) Along Y Axis: 只能沿着 Y 轴方向移动。
- (6) Along Z Axis: 只能沿着 Z 轴方向移动。

在具体操作中，可以通过按住键盘上的 X、Y 和 Z 键来实现鼠标光标只沿 X 轴、Y 轴或 Z 轴方向移动。

#### 3.3.2 鼠标的捕捉模式

在利用 HFSS 构建模型、指定边界条件及设置端口激励时，经常要用到一些特殊的点，如圆心点、中心点、四分之一点等，如果只利用鼠标在图形上拾取，要想准确地找到这些点是十分困难的。因此，HFSS 提供了对不同特殊点的识别方法，当鼠标经过这些特殊点时，就会自动锁定该点并显示出不同的标识来提醒用户判断拾取点的性质，从而实现准确定位。用户可以通过选择“Modeler→Snap Mode”命令打开如图 3-12 所示的“Snap Mode (捕捉模式)”对话框，对要捕捉的特殊点进行选择。

各复选框的含义如下。

(1) Grid: 捕捉网格点, 鼠标锁定时显示标识 .

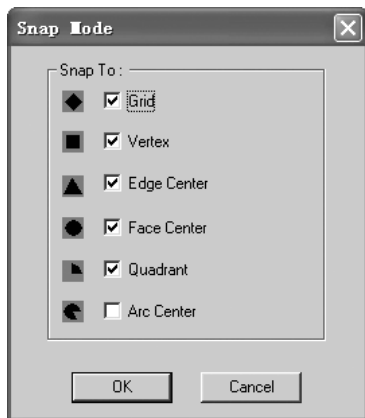







图 3-12 “Snap Mode (捕捉模式)”对话框

(2) Vertex: 捕捉模型顶点, 鼠标锁定时显示标识 .

(3) Edge Center: 捕捉棱边中心点, 鼠标锁定时显示标识 .

(4) Face Center: 捕捉平面中心点, 鼠标锁定时显示标识 .

(5) Quadrant: 捕捉棱边 1/4 长度点, 鼠标锁定时显示标识 .

(6) Arc Center: 捕捉圆心点, 鼠标锁定时显示标识 .


除此之外, 用户还可以通过工具栏中的快捷方式按钮  设置捕捉模式, 按钮凹进去表示已选择的捕捉模式, 反之表示处于未选择状态。

图 3-13 中给出了鼠标捕捉到不同特殊点时显示的标识, 记住不同点对应的标识非常有助于建模。

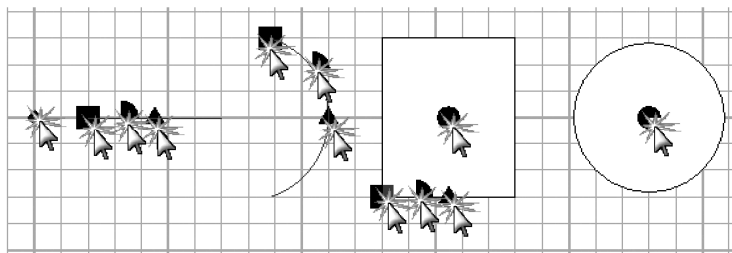


图 3-13 鼠标捕捉到不同特殊点时显示的标识

## 3.4 模型的属性

### 3.4.1 模型管理树

当创建一个物体模型后, 系统会自动将其添加到模型管理窗口的模型树结构中, 如图 3-14 所示。在模型树结构中可以找到所有已经构建的物体模型的命令和参数属性。展开模型树, 可以看到所有的物体模型以物体名称或材料类型分类, 分类方式可以通过选择“Modeler→Group Object by Material”命令进行切换。

#### 1. 属性

选中某物体时, 在属性窗口中会显示出它的各种属性, 双击此物体即可打开“属性”对话框。可以通过属性窗口或“属性”对话框来修改其属性。

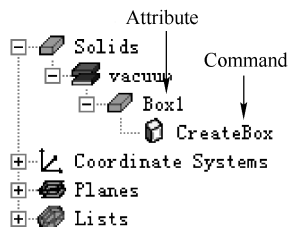


图 3-14 模型树结构

## 2. 命令

在模型树结构中展开被选物体文件夹，可以查看相关的指令属性列表。利用鼠标选中模型树结构中对应的命令，在属性窗口中将显示相应的属性。双击某条命令，将弹出“Command”对话框，通过属性窗口或该对话框可以修改此命令中对应的参数。

一旦选中某物体的命令后，在模型显示窗口中，此物体的轮廓将用粗线条显示出来。由于一个物体是几个原始模型的组合体，所以其命令列表中将包含几个物体的命令。选中这些命令中的任何一条，都可以选择选中的物体是否可见或修改其属性。

每个物体模型都包含两部分内容，如图 3-15 所示：一部分是模型名称、材料、颜色等属性，这部分内容包含在模型的“属性”对话框的“Attribute”选项卡中；另一部分是创建该模型的命令及模型具体的结构尺寸，这部分内容包含在模型的“属性”对话框的“Command”选项卡中。用鼠标双击相应的名称，便可以打开相应的选项卡，以对模型属性进行修改。



图 3-15 模型的“属性”对话框中的“Attribute”和“Command”选项卡

同时，模型树结构中还依次列出了对其进行的各种操作。用户可以通过依倒序删除某一命令来删除相应的操作。如图 3-16 所示，选择“Move”命令，按下键盘上的 Delete 键将其删除，则模型会回到没有移动之前的位置。

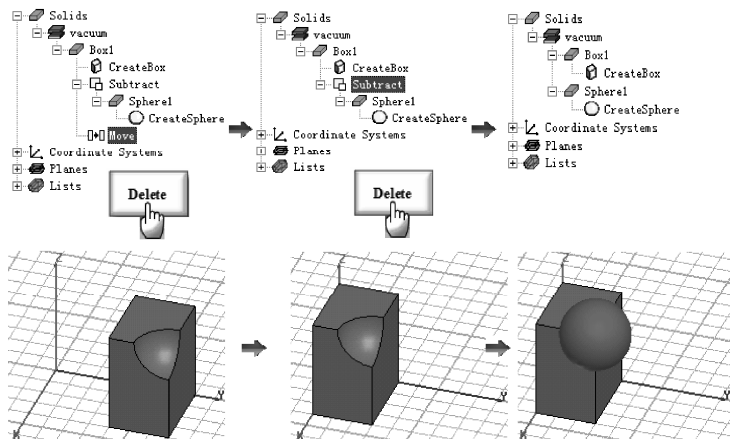


图 3-16 依倒序删除操作时的模型树和模型




### 3.4.2 模型属性

每个模型的属性都显示在模型的“属性”对话框中，包含“Command”选项卡和“Attribute”选项卡两项内容：

“Command”选项卡中的内容随用户创建模型的不同而不同，如创建长方体时，需要使用用户定义长方体的起始点坐标，以及长、宽、高等尺寸，而在创建球体时只需要定义球心坐标和球体半径即可；

“Attribute”选项卡则包括以下用户定义的特性。

(1) Name (名称)：所创建的物体模型的名称，默认名称是由原始模型名称加上序号依次定义的。HFSS 不支持中文名称。

(2) Material (材料)：模型的材料属性，默认时为真空 (vacuum)。单击后面的  按钮，在弹出的“Select Definition”对话框中，既可以选择模型的材料属性，也可以自主添加新的材料。


(3) Solve Inside (内部求解)：在 HFSS 的默认设置下，当模型的材料是介质或电导率小于  $10^5 \text{S/m}$  的导体时，自动选中该复选框，在求解过程中，将计算该模型的内部场；当模型的材料是理想导体或电导率大于  $10^5 \text{S/m}$  的导体时，不选中该复选框，在求解过程中，将不计算该模型的内部场，而只计算模型的表面场。要想修改默认电导率的门限设置，可以选择“Tools→Options→HFSS Options”命令，在弹出的对话框中更改“Solve Inside Thresh”的数值即可。

(4) Orientation (定位)：模型的参考坐标系，既可以是全局坐标系，也可以是用户后建的相对坐标系。

(5) Model (物体模型)：选中该复选框，该模型定义为实体模型，将参与 HFSS 的仿真计算；不选中该复选框，该模型定义为非实体模型，在进行 HFSS 仿真计算时，将忽略该模型的影响。

(6) Display Wireframe (显示轮廓线)：设置模型是否以边框的形式显示。选中，只显示模型的边框；不选中，则以实体形式显示。

(7) Color (颜色)：设置物体模型的颜色属性。单击“Edit”按钮，可在调色板中设置模型的颜色。

(8) Transparent (透明度)：设置模型的透明度。单击后面的  按钮，移动透明度滑动条块的位置设置物体的透明度 (0 代表不透明，1 代表全透明)。当选择 1 时，模型将以边框形式显示。

在默认情况下，创建完成物体模型后，会随即弹出物体的“属性”对话框，在该对话框中可以修改物体的位置和大小尺寸。有了这种途径，使得我们在建模时，可以先用鼠标单击创建任意尺寸的物体模型，然后在“属性”对话框中输入模型尺寸的精确值来完成模型的创建。“属性”对话框支持输入数据、公式、变量及单位。





## 3.5 二维基本模型的创建

二维图形是指在二维平面空间绘制的图形，HFSS 提供了部分基本的二维绘图工具，可以帮助用户完成二维图形的绘制。用户可以利用工具栏中的二维绘图命令，快速、方便地完成某些图形的绘制。由于 HFSS 是三维仿真软件，所以二维图形（如图 3-17 所示）主要作为参考线、面来辅助建模，或者为构建复杂的三维形状做准备。本节主要介绍线段和平面图形的绘制。

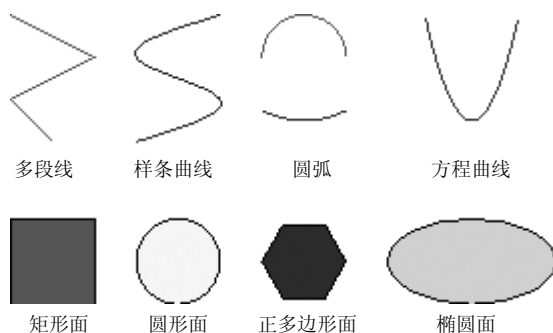


图 3-17 HFSS 的二维图形

### 3.5.1 二维线段的绘制

#### 1. 多段线

顾名思义，多段线是由多条直线段连接而成的。

##### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Line”命令。

工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Wire”工具条中的多段线按钮.

##### 2) 操作步骤

选择多段线命令后，鼠标进入捕捉状态，软件最底端的状态栏进入可编辑状态，提示用户输入多段线的起始点坐标，如图 3-18（a）所示。用户可以依次输入多段线各点的坐标，每次输入后按 Enter 键确认。最后一个坐标点输入完成后，再按 Enter 键完成多段线的绘制。

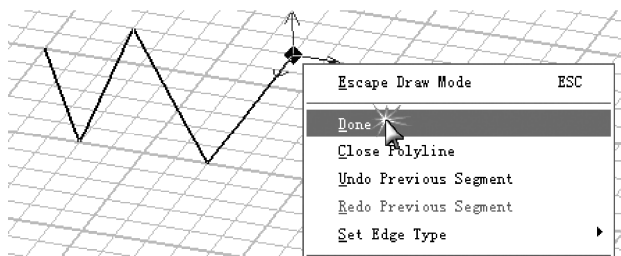
用户也可以操作鼠标在模型窗口中的工作平面上依次点选目标点来构建多段线。选定最后一个端点后，双击鼠标左键或单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单栏中选择“Done”即可完成多段线的创建，如图 3-18（b）所示。



（a）在状态栏中输入多段线各点的坐标

图 3-18 绘制多段线





(b) 在工作平面依次点选多段线目标点

图 3-18 绘制多段线 (续)

命令执行完成后，会弹出模型的“Properties (属性)”对话框，如图 3-19 所示。

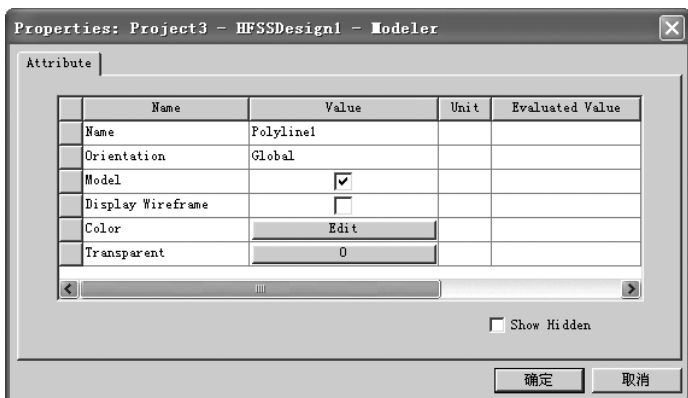


图 3-19 模型的“Properties (属性)”对话框

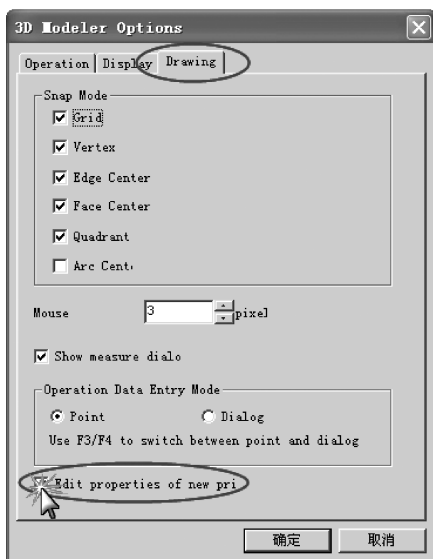


图 3-20 “3D Modeler Options”对话框

在“Properties (属性)”对话框中，可以对模型的名称、颜色、透明度等属性进行编辑和修改。如果系统没有自动弹出“浮动”的模型“属性”对话框，用户可以选择主菜单栏中的“Tools→Options→Modeler Options...”命令，弹出如图 3-20 所示的“3D Modeler Options”对话框，在该对话框中的“Drawing”选项卡的最下端，勾选“Edit properties of new primitives”复选框。勾选该项后，用户在每次建模操作后，软件将自动弹出“属性”对话框。

另外，用户还可以通过工程管理窗口下面固定的属性窗口进行查看和修改；也可以双击模型操作历史树下刚刚完成的绘图命令，在弹出的“属性”对话框中的“Command”选项卡中对模型参数进行编辑。

多段线主要是由多条直线段连接而成的，当多段线首尾相接时，软件将自动生成闭合平面，如果

不需要闭合平面，可以在模型管理窗口中单击对应的多段线操作历史树中最下端的“CoverLines”节点，然后按下键盘上的 Delete 键将自动生成的平面删除，只保留闭合曲线，如图 3-21 所示。

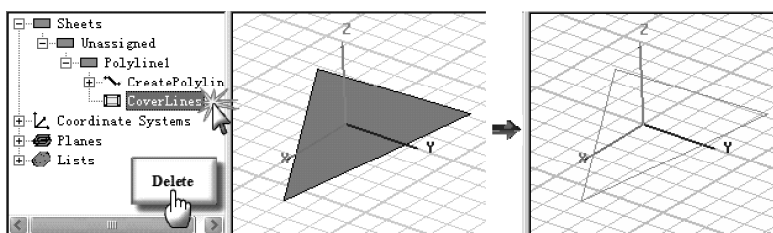


图 3-21 删除闭合平面



### 特别说明

在绘制过程中，如果产生误操作，如输错了坐标或选错了点，可以在鼠标右键的快捷菜单中选择“Undo Previous Segment”命令来删除最近输入或点选的点。要想取消绘图操作，可以按 Esc 键或在鼠标右键的快捷菜单中选择“Escape Draw Mode”命令返回。其他绘图操作类似。

## 2. 样条曲线

样条曲线是由指定的坐标点自动拟合而成的光滑曲线。

### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Spline”命令。

工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Wire”工具条中的样条曲线按钮。

### 2) 操作步骤

在状态栏中依次输入坐标点，按 Enter 键确认；或者用鼠标依次点选所需坐标点，选择右键菜单中的“Done”命令确认，如图 3-22 所示。

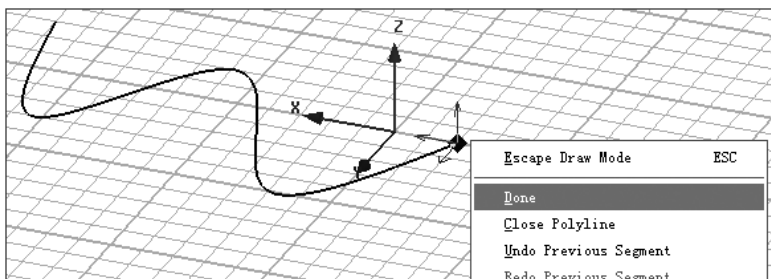


图 3-22 绘制样条曲线



### 特别说明

在 HFSS 中使用的样条曲线为非一致有理 B 样条（NURBS）曲线。使用 NURBS 曲线能够在控制点之间产生一条光滑的曲线。样条曲线可用于绘制形状不规则的图形。

### 3. 三点弧线

绘制过三个定点的圆弧，且其首尾不可衔接。

#### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Arc→3 point”命令。

工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Wire”工具条中的圆弧按钮。

#### 2) 操作步骤

通过状态栏依次输入三个坐标点，按 Enter 键确认，系统自动绘制以第一个坐标点为起点，以第三个坐标点为终点的圆弧；或者通过鼠标光标依次选取三个坐标点，选择右键菜单中的“Done”命令确认，如图 3-23 所示。

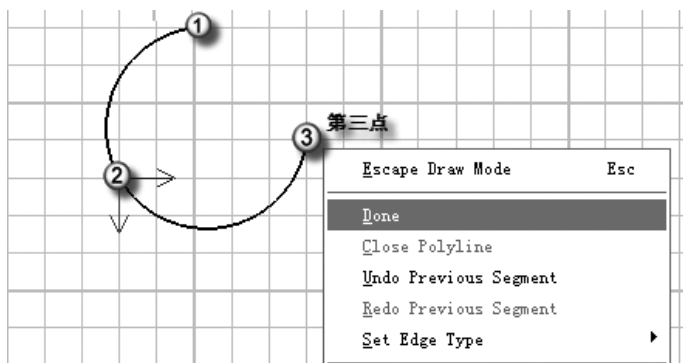


图 3-23 绘制三点圆弧

### 4. 中心点圆弧

绘制指定圆心位置和半径的圆弧，且其首尾不可衔接。

#### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Arc→Center point”命令。

工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Wire”工具条中的圆弧按钮。

#### 2) 操作步骤

通过状态栏依次输入圆弧所在圆心点坐标、圆弧起始点坐标和终止点坐标，按 Enter 键确认；或者通过鼠标光标依次选取圆弧所在圆心点、圆弧起始点和终止点，单击右键菜单中的“Done”命令确认，如图 3-24 所示。

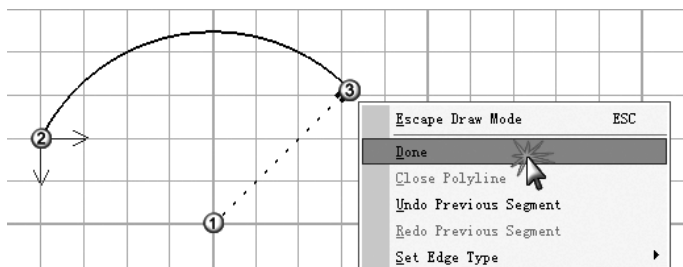



图 3-24 绘制中心点圆弧

## 5. 方程曲线


绘制用户定制的方程曲线。

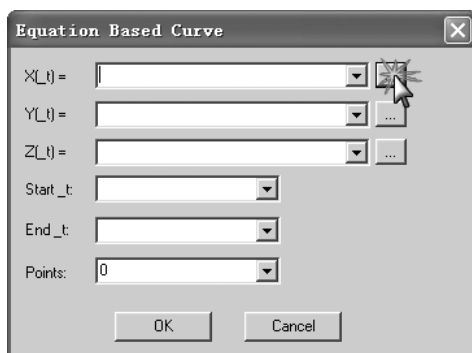
### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Equation Based Curve”命令。

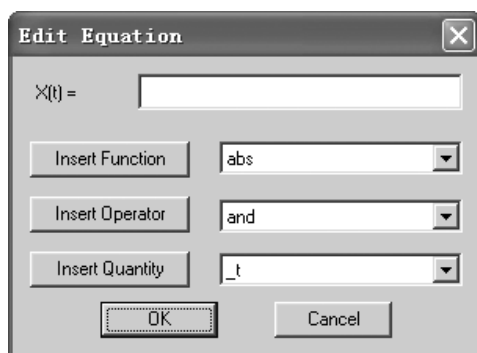
工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Wire”工具条中的曲线按钮。

### 2) 操作步骤

执行绘图命令后，会弹出如图 3-25 (a) 所示的“Equation Based Curve (方程曲线)”对话框。输入以  $t$  为变量的  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  的方程式，以及变量  $t$  的起始值，单击按钮，进入“Edit Equation (方程编辑)”对话框，如图 3-25 (b) 所示。



(a) “Equation Based Curve (方程曲线)”对话框



(b) “Edit Equation (方程编辑)”对话框

图 3-25 绘制方程曲线

在“Edit Equation (方程编辑)”对话框中，用户可以输入自编的方程式，或者通过选择现成的函数并“Insert”命令来插入和编辑所需的方程式。

(1) Insert Function: 插入系统自带的函数表达式。

(2) Insert Operator: 插入操作，包含各种与、或关系，加、减、乘、除等操作。

(3) Insert Quantity: 插入变量，包括系统指定的变量  $t$  和参数  $PI$  ( $\pi$ )。

绘制正弦函数曲线如图 3-26 所示。

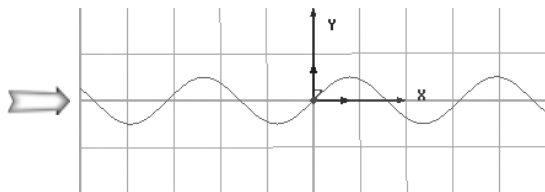
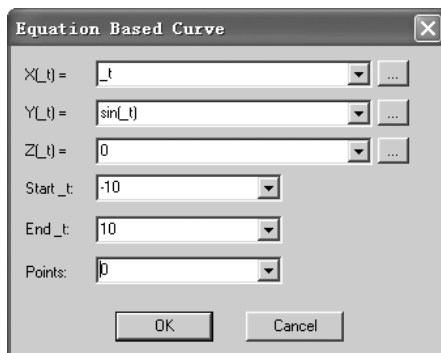


图 3-26 绘制正弦函数曲线

### 3.5.2 二维平面的绘制

#### 1. 矩形面

绘制二维矩形平面。

##### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Rectangle”命令。

工具栏：单击工具栏中的“2D Modeler Draw Sheet”工具条中的按钮。

##### 2) 操作步骤

执行矩形平面绘制命令后，工具栏中的坐标窗口处于激活状态，首先输入第一个点 $(X,Y,Z)$ ，确定矩形平面的起点；然后输入第二个点，确定矩形平面长和宽的相对坐标 $(dX,dY)$ ，按 Enter 键确认。

也可以用鼠标在模型窗口中点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标根据平面所需的长和宽选定第二个点。操作完成后，系统会自动生成用户指定尺寸的矩形平面，并弹出矩形平面的“属性”对话框，如图 3-27 所示。



图 3-27 矩形平面的“属性”对话框

在该对话框中的“Command”选项卡中可以对矩形面的结构参数进行修改和调整。

(1) Position：模型结构的起始点坐标。

(2) Axis：平面模型的法向坐标轴，修改该选项可以使平面位于不同的坐标平面。例如，选择 Z 轴，则平面位于与 Z 轴垂直的坐标平面内，平面的长、宽尺寸为 XSize 和 YSize；选择 X 轴，则平面位于与 X 轴垂直的坐标平面内，平面的长、宽尺寸为 ZSize 和 YSize；选择 Y 轴，则平面位于与 Y 轴垂直的坐标平面内，平面的长、宽尺寸为 ZSize 和 XSize。


在“Attribute”选项卡中可以对模型的名称、颜色、透明度等属性进行修改。

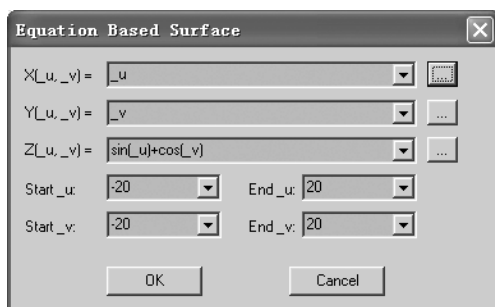
如果系统没有自动弹出“浮动”的模型“属性”对话框，用户可以通过工程管理窗口下面的固定模型属性窗口进行查看和修改；也可以双击模型操作历史树下刚刚完成的绘图命令，在弹出的“属性”对话框的“Command”选项卡中对模型参数进行编辑；同时，还可

以选择主菜单栏中的“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在弹出的“3D Modeler Options”对话框中的“Drawing”选项卡最下端勾选“Edit properties of new primitives”复选框，使系统在下次图形绘制命令完成后，自动弹出“浮动”的模型“属性”对话框。

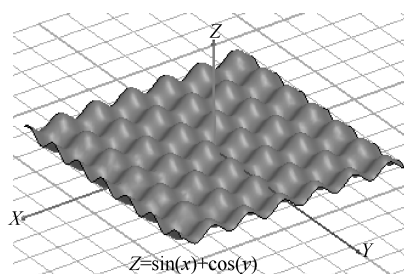
其他平面的绘制方法和步骤与矩形平面的绘制方法和步骤基本相同，这里就不再一一进行介绍。

下面简单介绍一下基于表面方程的平面构造方法。

选择“Draw→Equation Based Surface”命令，或单击窗口工具栏中的快捷图标按钮，在弹出的“Equation Based Surface”对话框中对曲面方程进行设置。例如，构造一个满足  $Z=\sin(x)+\cos(y)$  方程的平面结构的参数设置如图 3-28 所示。



(a) “Equation Based Surface”对话框



(b) 满足  $Z=\sin(x)+\cos(y)$  方程的平面

图 3-28 基于表面方程的平面构造

### 3.6 三维基本模型的创建

三维基本模型是 HFSS 构建仿真模型的基本结构单元。HFSS 提供的三维基本模型有长方体、圆柱体、棱柱体、圆锥体、球体、圆环体、螺旋体、平面螺旋体等，如图 3-29 所示。

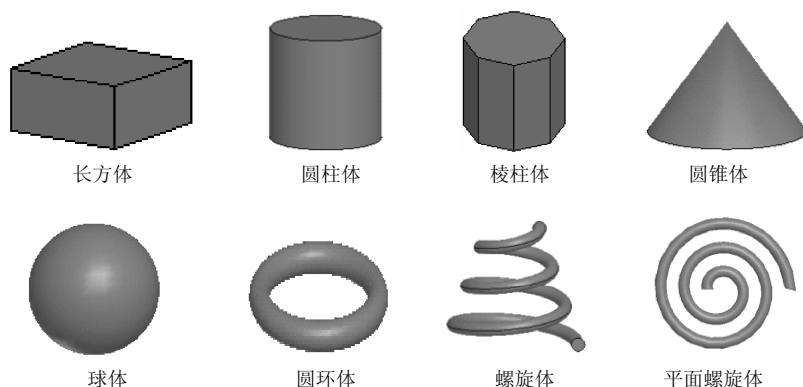


图 3-29 HFSS 提供的三维基本模型

下面简要介绍一下三维基本模型的创建方法和步骤。

### 3.6.1 创建长方体模型

#### 1) 执行方式

菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Box”命令。

工具栏：单击工具栏中的“3D Modeler Draw Solid”工具条中的按钮.

#### 2) 操作步骤

首先创建长方体的矩形基底，其创建方法和步骤与矩形平面的创建方法和步骤一样，然后输入或选定第三个点确定长方体的高，如图 3-30 所示。

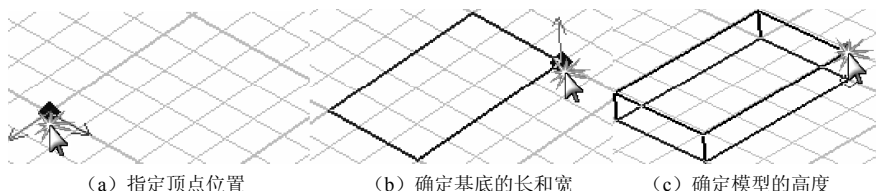


图 3-30 创建长方体模型

操作完成后，弹出“浮动”的物体“属性”对话框，在该对话框的“Command”选项卡（如图 3-31 所示）中可以对模型的结构尺寸进行调整，包括模型起始点坐标，以及在 X、Y、Z 方向上的模型的长、宽、高尺寸。

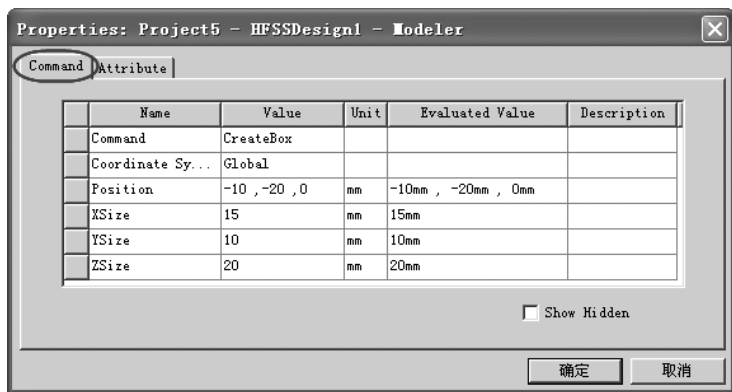



图 3-31 长方体模型“属性”对话框的“Command”选项卡

在长方体模型“属性”对话框的“Attribute”选项卡中，可以对模型的名称、材料、颜色等属性进行设置，如图 3-32 所示。

“Attribute”选项卡中各项的具体含义如下。

(1) Name: 所创建的物体模型的名称，HFSS 不支持中文名称。

(2) Material: 模型的材料属性。默认时为真空 (vacuum)。单击后面的  按钮，在弹出的“Select Definition”对话框中，既可以选择模型的材料属性，也可以自主添加新的材料。

(3) Solve Inside: 在 HFSS 的默认设置下，当模型的材料是介质或电导率小于 105S/m



的导体时，自动选中该复选框，在求解过程中，将计算该模型的内部场；当模型的材料是理想导体或电导率大于  $105\text{S/m}$  的导体时，不选中该复选框，在求解过程中，将不计算该模型的内部场，而只计算模型的表面场。要想修改默认的电导率门限设置，可以选择“Tools→Options→HFSS Options”命令，在弹出的对话框中更改“Solve Inside Thresh”的数值即可。




图 3-32 长方体模型“属性”对话框的“Attribute”选项卡

(4) Orientation: 模型的参考坐标系，既可以是全局坐标系，也可以是用户后创建的相对坐标系。

(5) Model: 选中该复选框，该模型定义为实体模型，将参与 HFSS 的仿真计算；不选中该复选框，该模型定义为非实体模型，在进行 HFSS 仿真计算时，将忽略该模型的影响。

(6) Display Wireframe: 设置模型是否以边框的形式显示。选中，只显示模型的边框；不选中，则以实体形式显示。

(7) Color: 设置物体模型的颜色属性。单击“Edit”按钮，可在调色板中设置模型颜色。

(8) Transparent: 设置模型的透明度。单击后面的  按钮，移动透明度滑动条块位置设置物体的透明度（0 代表不透明，1 代表全透明）。当选择 1 时，模型将以边框形式显示。

### 3.6.2 创建其他三维基本模型

其他三维基本模型的创建方法和步骤与长方体模型的创建方法和步骤相似，本书不再一一详细介绍。下面仅给出各模型创建的基本步骤（如图 3-33～图 3-37 所示），读者可以按照图示进行练习。

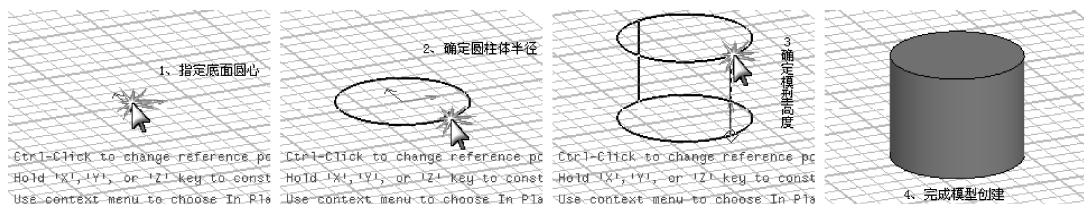


图 3-33 圆柱体的创建过程

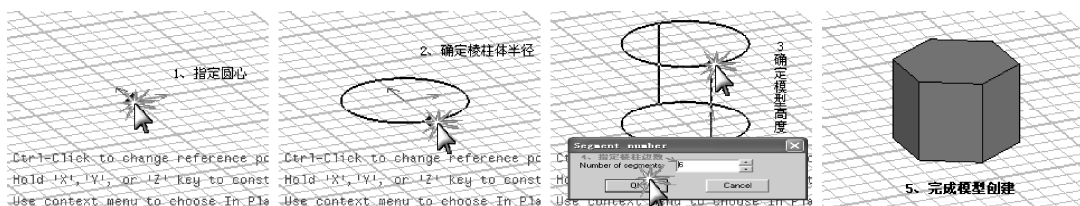


图 3-34 棱柱体的创建过程

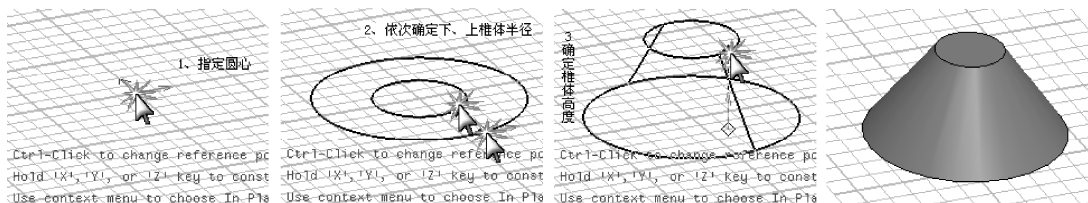


图 3-35 圆锥体的创建过程

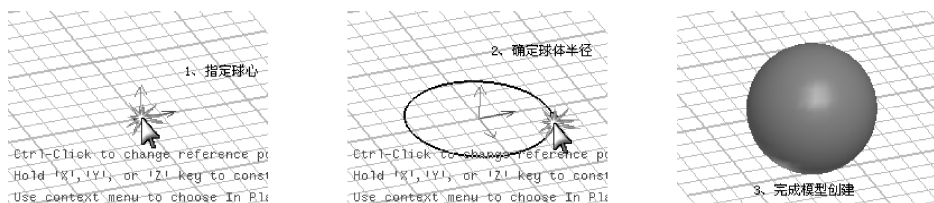


图 3-36 球体的创建过程

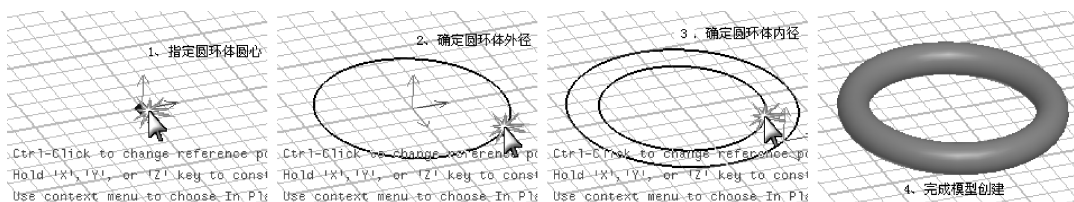


图 3-37 圆环体的创建过程

以上给出了部分三维基本模型的创建过程截图，目的是让读者对三维基本模型的创建过程有一个直观的感性认识。建议读者将所有模型的创建都练习一遍，以加深印象和掌握基本的操作方法。

### 3.6.3 创建螺旋体模型

下面着重介绍一下螺旋结构模型的创建。在 HFSS 中，螺旋结构模型的创建命令需要在选中线、面模型的前提下才可以进行操作，HFSS 认定所选的线、面结构为所建螺旋结构的横截面形状，并在此基础上创建三维螺旋结构。



## 1. 创建三维螺旋模型



### 1) 执行方式


菜单栏：选择菜单栏中的“Draw→Helix”命令。

工具栏：单击工具栏中的“3D Modeler Draw Solid”工具条中的按钮.

### 2) 操作步骤

下面以横截面为圆面，螺旋轴向为 Z 轴的螺旋体为例进行介绍。

第一步：创建螺旋体横截面平面模型，然后选中该模型，如图 3-38 所示。当选中圆形面后，螺旋操作命令图标由灰色激活为黑色高亮.

第二步：执行命令，此时需要用户输入两个坐标点，用来确定螺旋结构的延伸方向，如图 3-39 所示，而这两个坐标点的距离并不代表螺旋结构的实际长度；螺旋结构底面半径则由第一个坐标点到选中二维圆面中心的距离确定。

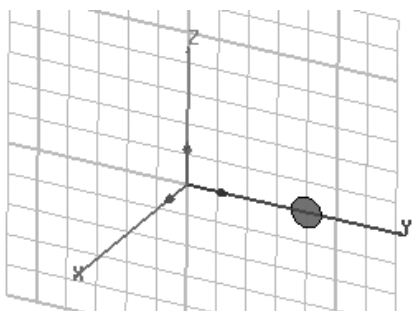


图 3-38 创建并选中螺旋体横截面平面模型

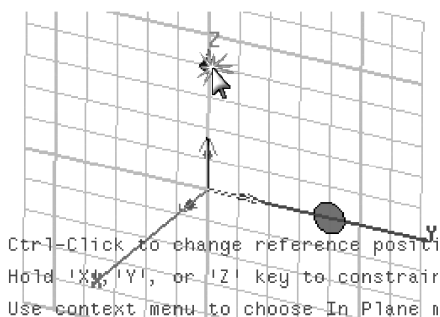


图 3-39 指定两个坐标点来确定螺旋半径和方向

第三步：编辑螺旋属性。输入两个坐标点，确定完螺旋底面半径和延伸方向后，会弹出“Helix”对话框，如图 3-40 所示。

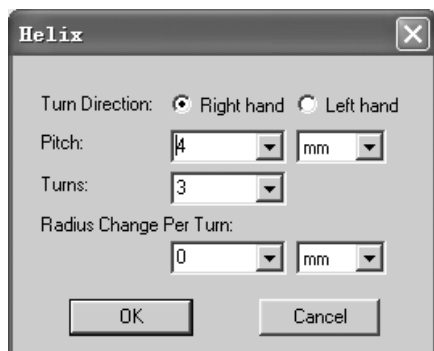


图 3-40 螺旋属性对话框

该对话框中各选项代表的具体含义如下。

(1) Turn Direction: 螺旋旋向，包括左旋和右旋。左旋和右旋的确定方法为：右手半握，拇指伸开，拇指指向螺旋的延伸方向，螺旋的旋转方向与其他四指的弯曲方向相同即为右手螺旋，反之为左手螺旋，如图 3-41 所示。



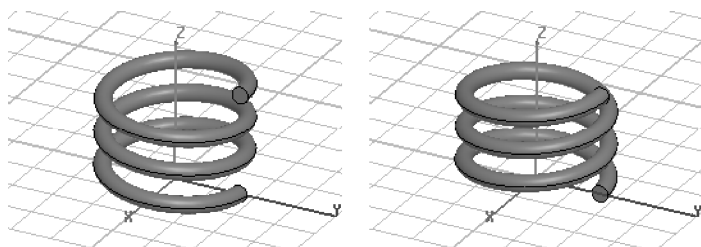


图 3-41 左手螺旋与右手螺旋

(2) Pitch: 螺旋的螺距, 代表螺旋每旋转一圈所上升的高度。

(3) Turns: 螺旋的圈数。

(4) Radius Change Per Turn: 螺旋半径的变化量, 表示螺旋每圈半径的变化量, 数值可正可负, 数值为正时表示螺旋半径逐圈变大; 数值为负时表示螺旋半径逐圈变小; 数值为零时表示螺旋半径始终保持不变。效果如图 3-42 所示。

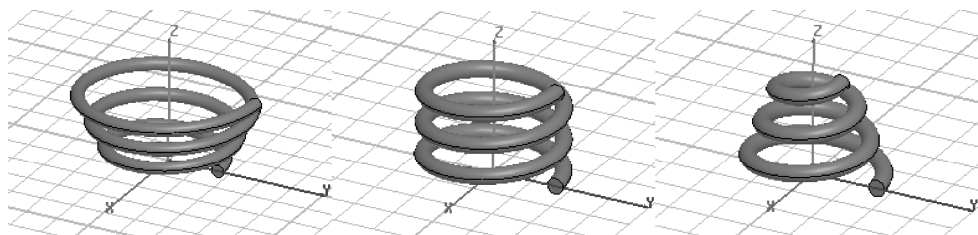


图 3-42 螺旋半径变化量为正、零、负时的对比

第四步: 设置完螺旋属性后, 单击“OK”按钮确认, 系统便按照设置的参数自动生成螺旋结构, 此时原来的圆形平面消失, 不再以独立的模型结构显示, 相关操作会自动添加到模型操作历史树中。

## 2. 创建平面螺旋模型

平面螺旋体的创建方法和步骤与三维螺旋体的类似, 这里不再详细介绍, 不同之处是: 输入两坐标点确定的是平面螺旋所在平面的法向方向; 螺旋属性中没有螺距项, 螺旋半径的变化量不能为零。另外, 创建平面螺旋体时, 截面模型可以是一维的线模型, 此时生成微带形式的平面螺旋结构, 如图 3-43 所示。

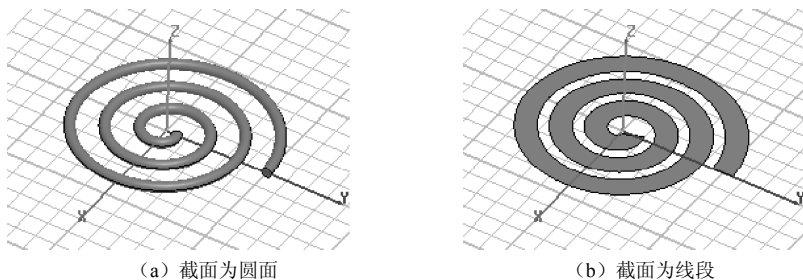


图 3-43 平面螺旋结构



## 3.7 非基本模型的创建

HFSS 除了可以创建模型库中的基本模型外，还可以通过 Sweep、Connect 等特殊的命令操作及布尔运算在基本模型的基础上创建其他的物体模型。本节主要从几个特殊的命令出发对部分特殊模型的创建过程进行介绍，以期使读者对这些命令有一个基本的了解。对于布尔运算，将在 3.9.3 节中进行详细的介绍。

### 3.7.1 由线生面

#### 1. 由闭合曲线生成面

在 HFSS 中，对于闭合曲线的处理有两种：一种是以线框形式显示，即只显示闭合曲线部分，其闭合部分为空白；另一种是将闭合曲线填满生成一个平面。在默认设置下，系统自动将闭合曲线生成平面，用户可以通过绘制线段命令，依次输入非基本形状平面的各个轮廓点坐标来构造闭合曲线，从而由系统自动生成非规则平面。如果闭合曲线没有自动生成平面，用户可以选择主菜单栏中的“Tool→Options→Modeler options”命令，在弹出的“3D Modeler Options”对话框中勾选“Automatically cover closed polyline”复选框，最后单击“确定”按钮即可，如图 3-44 所示。由封闭曲线生成面的效果如图 3-45 所示。

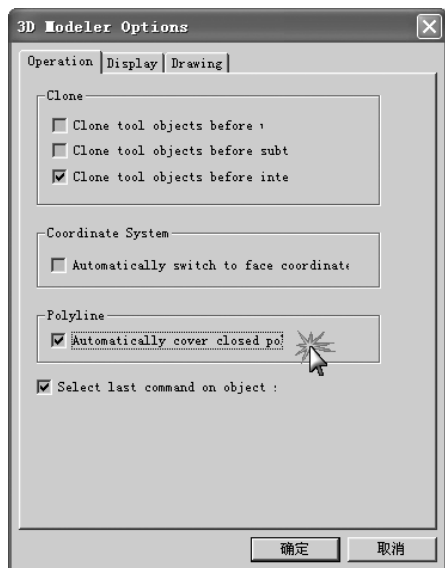


图 3-44 “Automatically cover closed Polyline” 的设置对话框

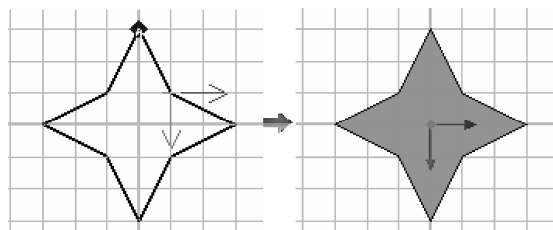


图 3-45 由封闭曲线生成面的效果

#### 2. “Sweep” 命令的应用

##### 1) 沿坐标轴旋转

可以通过让工具曲线绕设定轴旋转得到旋转对称面，这在创建抛物面天线模型时非常有





用。首先通过曲线方程建立抛物线并选中（如图 3-46 所示），然后打开鼠标右键的快捷菜单，选择“Sweep”命令子菜单中的“Around Axis”命令，在弹出的“Sweep Around Axis”对话框中设置抛物线的旋转轴、角度等参数，最后单击“OK”按钮执行命令，如图 3-47 所示。

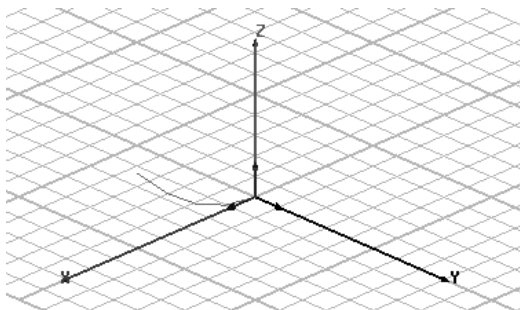
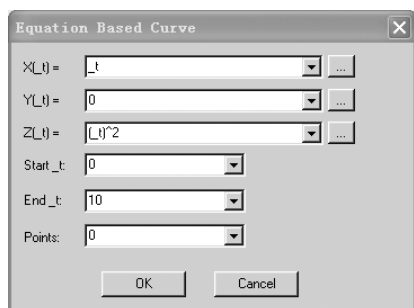


图 3-46 绘制抛物线并选中

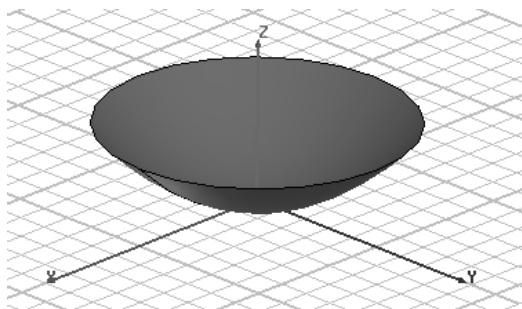
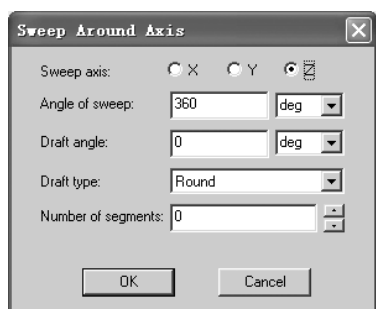


图 3-47 抛物线沿轴旋转生成抛物面

## 2) 沿矢量线段扫描

用户还可以通过“Sweep”命令将线模型沿矢量线段扫描生成非基本平面。首先创建线形模型并选中，再选择主菜单栏中的“Draw→Sweep→Along Vector”命令，或者在三维模型显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Edit→Sweep→Along Vector”命令，指定矢量线段，生成所需的平面结构，如图 3-48 所示。

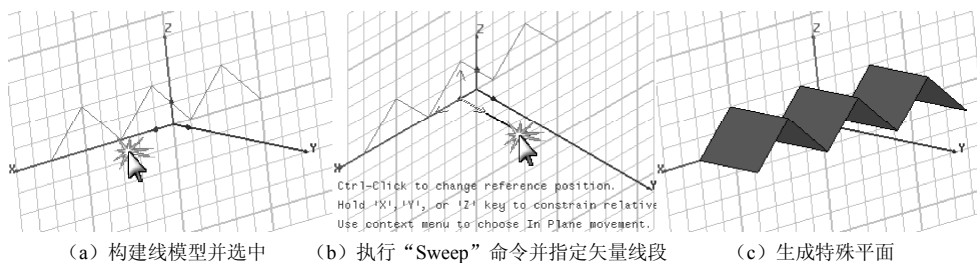


图 3-48 工具线沿矢量线段扫描生成面

### 3) 沿指定路径扫描

在“Sweep”命令中允许用户绘制扫描（延伸）路径，然后将工具曲线沿绘制的路径扫描形成特定的曲面结构。首先分别绘制工具曲线和路径曲线，然后同时选择两条曲线，执行“Draw→Sweep→Along Path”命令生成曲面结构，如图 3-49 所示。

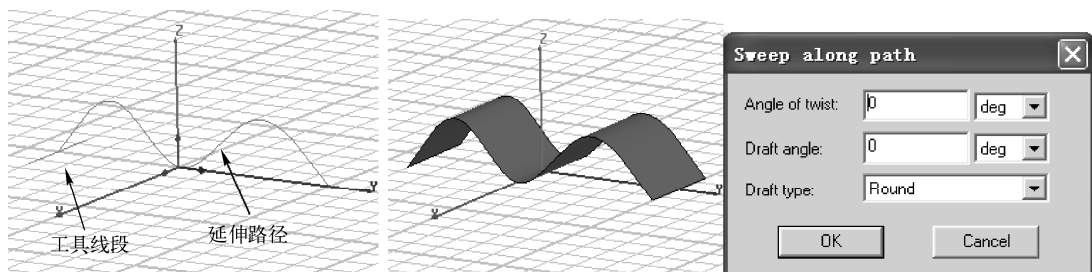


图 3-49 工具线沿指定路径扫描生成面



#### 特别说明

选中两条线段时，系统默认第一条被选中的线段为工具线段，第二条被选中的线段为路径线段。

### 3. “Connect”命令的应用

用户还可以通过“Connect”命令由多线生成面。“Connect”命令可以将两条线段之间的空白部分填满生成新的平面结构。首先创建两条工具线段并同时选中，再执行“Modeler→Surface→Connect”命令，或选择鼠标右键菜单中的“Edit→Surface→Connect”命令生成所需平面，如图 3-50 所示。

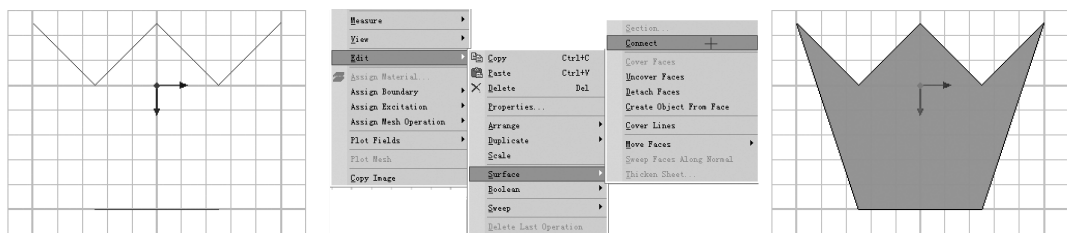


图 3-50 通过“Connect”命令由线生面



#### 特别说明

“Connect”命令允许用于连接的两条线段不在同一平面，此时生成的平面将产生扭曲。

### 3.7.2 由面生体

#### 1. “Sweep” 命令操作

当用于执行“Sweep”命令的一维图形转换为平面模型时，软件将生成横截面为二维工具平面的三维物体模型。同样，对于平面结构的“Sweep”命令操作也具有三种延伸模式：Around Axis（围绕旋转轴）、Along Vector（沿矢量线段）、Along Path（沿路径）。其操作过程与由线生面的“Sweep”命令操作相似：首先绘制二维工具平面模型并选中，然后选取“Sweep”命令中所需的扫描类型，执行对应的命令即可，如图 3-51 所示。

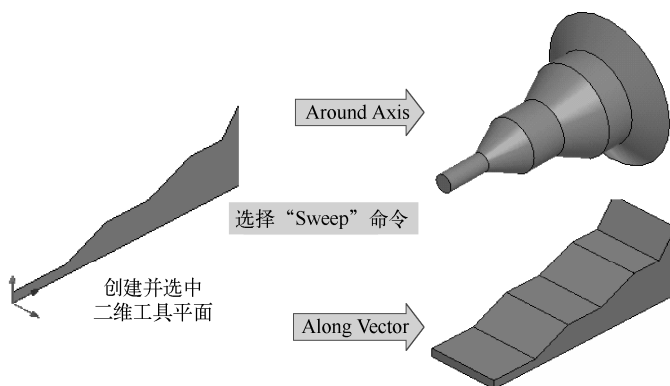


图 3-51 通过“Sweep”命令由面生体

#### 2. “Connect” 渐变操作

利用“Connect”命令可以实现两个平面的连接操作，如果两个工具平面的形状不同，新模型的轮廓结构便由所选平面渐变得到，如图 3-12 所示。

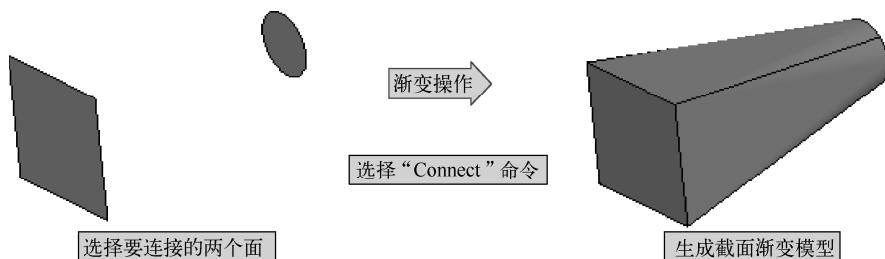


图 3-52 通过“Connect”命令由面生体渐变操作



#### 特别说明

渐变操作的两个工具面只要不相交、不正交，可以位于任意位置，“Connect”命令均可以构建一个面到另一个面的渐变模型。



### 3.7.3 扭波导的创建

结合以上介绍的“Connect”命令，下面以 BJ120 波导为例，介绍一下 90° 扭波导三维模型的创建方法，以进一步增强读者对“Connect”命令的认识。矩形波导横截面尺寸如图 3-53 所示。

BJ120 波导的尺寸为： $a=19.05\text{mm}$ ， $b=9.525\text{mm}$ 。

(1) 首先通过主菜单栏的“Modeler→Units”命令设置设计使用的单位为 mm（毫米），然后通过主菜单栏的“HFSS→Design Properties”命令添加设计变量  $a$ 、 $b$  及  $A1$ 、 $B1$ ，它们分别表示矩形波导口长、短边的内、外径尺寸，如图 3-54 所示。另外，还有变量  $L=90\text{mm}$ ，为扭波导长度。

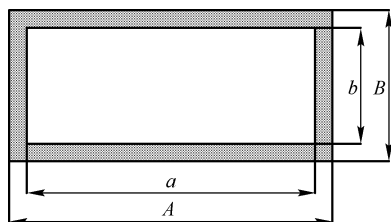


图 3-53 矩形波导横截面尺寸

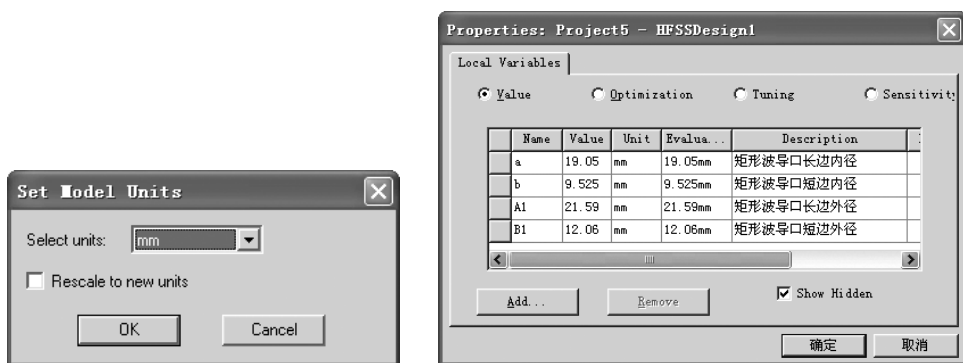


图 3-54 设置工程单位及添加设计变量

(2) 选择“Draw→Equation Based Curve”绘制方程曲线命令，分别创建两条工具线段，即可以是扭波导宽边的两条棱边曲线，也可以是窄面的两条棱边曲线。以宽边的两条棱边曲线为例，曲线方程的参数设置如图 3-55 所示。

Name	Value	Name	Value
Command	CreateEquationCurve	Command	CreateEquationCurve
Coordinate Sy...	Global	Coordinate Sy...	Global
X(t)	$\cos(t - \arctan(a/b)) \cdot \sqrt{a^2 + b^2} / 2$	X(t)	$\cos(t + \arctan(a/b)) \cdot \sqrt{a^2 + b^2} / 2$
Y(t)	$\sin(t - \arctan(a/b)) \cdot \sqrt{a^2 + b^2} / 2$	Y(t)	$\sin(t + \arctan(a/b)) \cdot \sqrt{a^2 + b^2} / 2$
Z(t)	$-t \cdot L / (\pi / 2)$	Z(t)	$-t \cdot L / (\pi / 2)$
Start_t	0	Start_t	0
End_t	$\pi / 2$	End_t	$\pi / 2$
Number of Points	0	Number of Points	0

图 3-55 90° 扭波导棱边曲线方程的参数设置

同理，可以得到窄边的两条棱边曲线的方程，此处不再列出，读者可自行推导。

(3) 同时选中两条曲线，执行“Modeler→Surface→Connect”命令，或选择鼠标右键菜单中的“Edit→Surface→Connect”命令，生成扭波导宽边一面的扭曲平面，如图 3-56 所示。

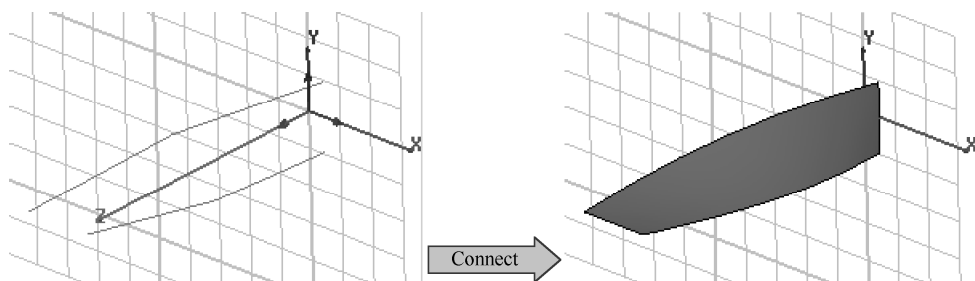
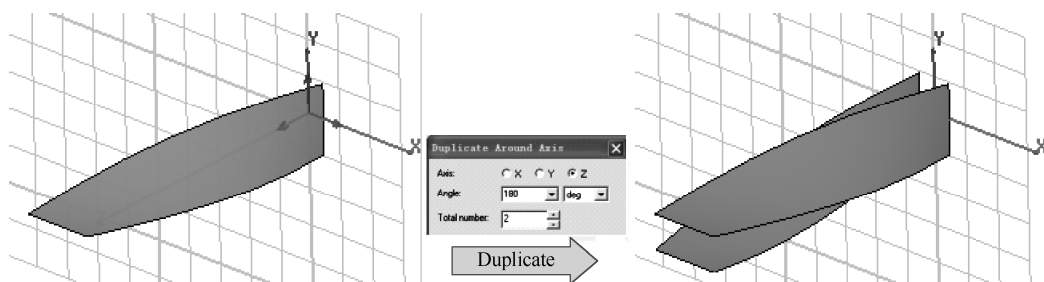


图 3-56 由棱边曲线生成扭曲平面

(4) 选中生成的扭曲平面，执行“Edit Duplicate Around Axis”命令，在弹出的“Duplicate Around Axis”对话框中选择旋转轴为 Z 轴，角度为  $180^\circ$ ，总个数为 2，单击“OK”按钮确定，便生成了扭波导宽边的另一侧扭曲平面，如图 3-57 所示。

图 3-57 沿 Z 轴旋转  $180^\circ$  复制扭曲平面

(5) 同时选中两个扭曲平面，执行“Modeler→Surface→Connect”命令，或选择鼠标右键菜单中的“Edit→Surface→Connect”命令，生成  $90^\circ$  扭波导模型，如图 3-58 所示。

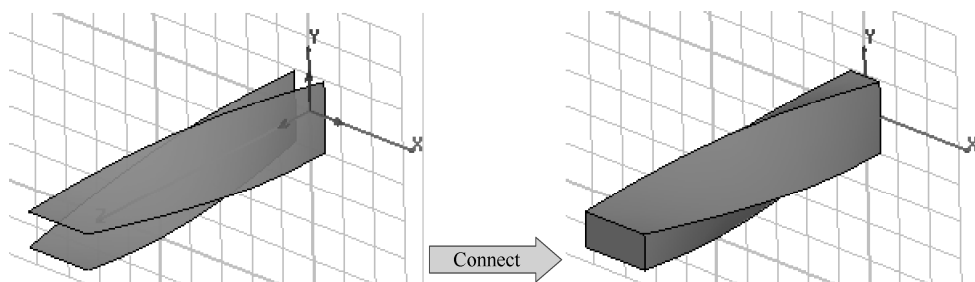


图 3-58 利用“Connect”命令由面生成扭波导体

至此， $90^\circ$  扭曲的 BJ120 波导模型就创建完成了。同理，读者可以通过首先创建扭波导的窄边面来构建扭波导。

如果读者想创建一个实际形式的扭波导，即中间为空腔，四周为金属壁的模型，只要将模型参数中的 a 和 b 改换成 A1 和 B1，用以上方法和步骤再生成一个大一点的扭波导，然后两者相减即可，具体步骤不再介绍。两种波导形式和场分布如图 3-59 和图 3-60 所示。

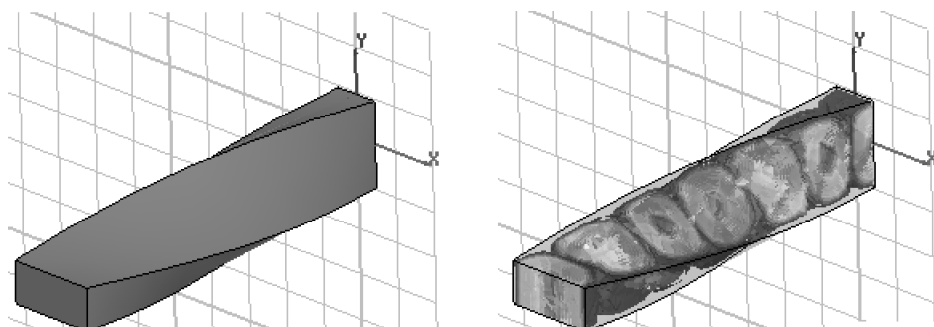


图 3-59 内尺寸的扭波导及腔内场分布

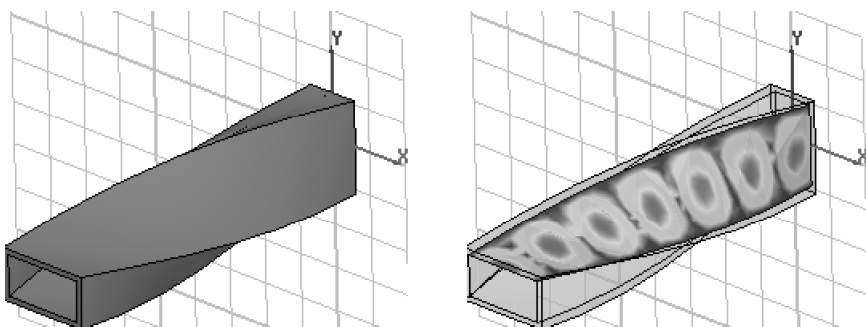


图 3-60 带壁厚的空心扭波导及内腔壁上的场分布



#### 特别说明

本书介绍的扭波导创建方法适用于波导的扭曲度小于  $180^\circ$  的情况，当扭曲度大于  $180^\circ$  后，由于结构的重复性，部分操作命令在执行时将会出现错误。另外，关于扭波导的建模方法绝不只此一种，读者可以尝试通过其他途径构建。这里介绍该方法是为了加深读者在创建非基本模型时，对几个常用操作命令的了解，以熟悉由线生面、由面生体的操作。

## 3.8 模型的选择

创建完模型后，当需要对某一结构模型进行操作时，首先就要选择该模型。HFSS 提供了各种各样的选择模型对象的方法，可以方便地进行选择操作。本节将详细介绍 HFSS 中与模型选择相关的内容。

### 3.8.1 选择类型与模式

#### 1. 选择类型

在主菜单栏中的“Edit→Select”命令的子菜单中，可以看到 HFSS 中主要有 5 种选择类型，如下所示。

(1) Object (物体)：选中物体模型。在默认情况下，HFSS 的选择类型为 Object。单击



显示窗口中的一个物体或操作历史树中物体的名称，物体便被选中。该选择类型对应的快捷键为字母“O”。按键盘上的字母O键，则HFSS的选择类型变为Object。

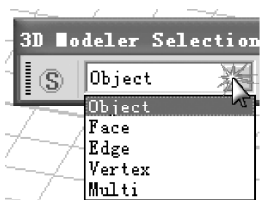
(2) Face (面): 选择模型的面。该选择类型对应的快捷键为字母“F”。

(3) Edge (棱边): 选择模型的棱边。该选择类型对应的快捷键为字母“E”。

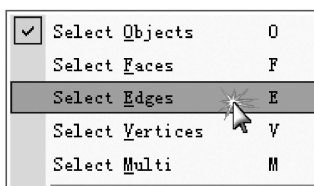
(4) Vertex (顶点): 选择模型的顶点。该选择类型对应的快捷键为字母“V”。

(5) Multi (复合): 可以同时选择模型、面、棱边和顶点。该选择类型对应的快捷键为字母“M”。

用户既可以通过工具栏中的模型选择工具条切换不同选择类型，也可以在模型显示窗口单击鼠标右键，在弹出的子菜单中选择不同的选择类型，还可以利用每种选择类型默认的键盘上的快捷字母键来切换，如图3-61所示。



(a) 工具栏中的模型选择菜单



(b) 鼠标右键弹出的模型选择菜单

图 3-61 模型选择类型的切换

## 2. 选择模式

除了不同的选择类型外，HFSS 还提供了不同的选择模式来方便用户对物体模型的选择操作。主要的选择模式有以下几种。

(1) All Objects: 选择所有物体模型。

(2) All Visible Objects: 选择所有可视物体模型。

(3) By Name: 通过模型名称选择。

### 3.8.2 物体模型的选择方法

#### 1. 高亮度动态选择

在默认设置条件下，在模型显示窗口中移动鼠标光标到想要选择的模型上，当该模型的轮廓线变为高亮时，说明光标已经捕获到该物体模型，此时单击鼠标左键，便选中了该模型；当某一模型被选中后，在默认情况下，会显示为粉色，而其他物体模型的透明度会变大，以方便显示和突出选中的物体模型。接下来就可以对所选模型进行具体操作了。

#### 2. 通过模型操作历史树选择

正如前文创建模型时提到的，HFSS 创建模型之后，对应的操作都会自动添加到模型操作历史树中，在其对应的管理窗口中包含了用户创建的所有模型，以及对应的操作命令，在其中找到并单击相应的模型名称，即可选中该物体模型。



### 3. 通过模型名称选择

选择主菜单栏中的“Edit→Select→By Name”命令，在弹出的模型选择对话框中包含了所有用户创建的模型名称，选择需要选中的模型对应的名称，单击对话框中的“OK”按钮确认，便实现了对该模型的选择。

### 4. 多个模型的选择

按住键盘上的 Ctrl 键，同时按照以上方法，依次选择所需模型便可实现对多个物体模型的选择。还可以选中主菜单栏中的“Edit→Select All”命令或使用快捷键 Ctrl+A 来实现选中模型窗口中所有可见的物体模型。

### 5. 被遮挡模型的选择

当需要选择位于模型内部的物体，或者不想改变当前视角，而要选择位于其他模型的遮挡状态时，可以首先选择外部模型或前面遮挡的物体模型，然后按下键盘上的快捷键 Ctrl+B 或 B 键来实现选择模型的切换，或者在右键菜单中选择“Next Behind”命令进行切换，该命令对 Object 和 Plane 选择类型都适用。效果如图 3-62 所示。

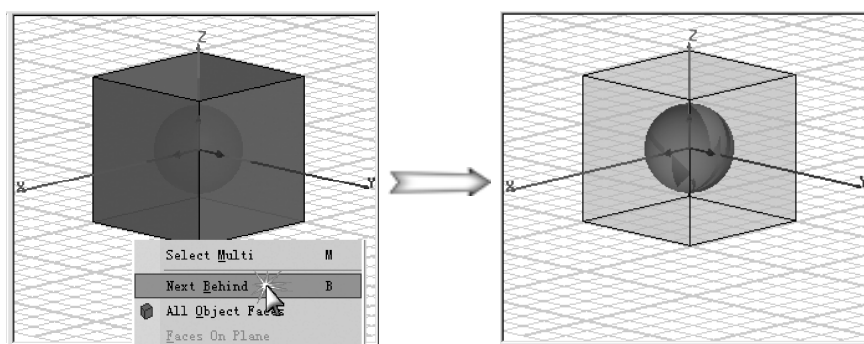


图 3-62 正方体内部球体的选择



注意

当被遮挡的不止一个物体时，可以重复该操作，直到选中所需的物体为止。

## 3.9 模型的调整

### 3.9.1 几何变换

模型的几何变换包括模型的移动、复制、缩放等操作。在进行相应操作前，首先应选中操作对象模型。下面依次介绍如何对选取的模型进行移动、复制和缩放。

## 1. 模型的移动

对选中的物体模型进行移动可以通过在主菜单栏或鼠标右键菜单中选择“Edit→Arrange”子菜单中的相应命令来进行，主要有平移、旋转和镜像3种不同的移动方式。

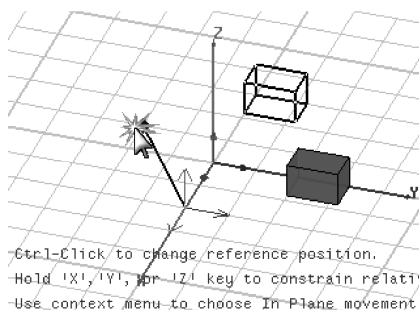


图 3-63 模型沿着用户指定的矢量  
线段进行平行移动

(1) Move: 平移操作。选择该命令后，系统要求用户指定两个坐标点，这两个坐标点将确定一个矢量线段，模型将沿着该矢量线段方向平行移动(如图 3-63 所示)，移动距离由线段的长度决定。该命令在工具栏中对应的快捷按钮为

(2) Rotate: 旋转模型。沿当前坐标系的坐标轴进行旋转(如图 3-64 所示)，创建新的相对坐标系并输入想要的旋转角度，即可实现模型的任意旋转。该命令在工具栏中对应的快捷按钮为

(3) Mirror: 镜像移动(如图 3-65 所示)，可将选定的模型移动到指定平面的镜像位置。执行该命令需要用户指定两个坐标点来确定用于镜像操作的平面，第一个坐标点为平面经过的点，第二个坐标点与第一个点用来指定该平面的法向矢量，这样镜像平面就被确定了。该命令在工具栏中对应的快捷按钮为

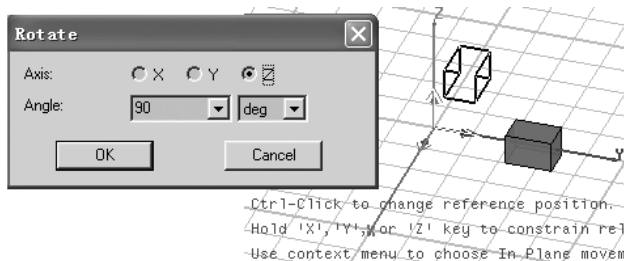


图 3-64 沿着当前坐标轴旋转

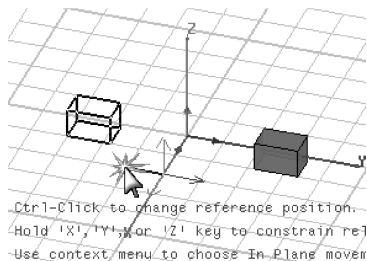


图 3-65 镜像移动

## 2. 模型的复制

(1) Copy: 单纯的复制模型。

HFSS 提供了单纯的复制和粘贴命令来实现模型的复制和粘贴。用户首先选择需要复制的模型，然后在菜单栏或右键菜单的“Edit”命令中选择“Copy”命令，然后选择“Paste”命令，这样便复制了一个与所选模型一样的新模型，同时在操作历史树中将出现名称与所选模型相同但末尾多了一个序号的新模型。利用复制和粘贴命令复制的新模型与原始模型的尺寸相等，坐标位置相同，在三维模型窗口显示时是重叠在一起的，可以通过点选操作历史树中不同的模型名称来进行选择。

(2) Along Line: 沿一个矢量方向复制模型。

可以通过指定矢量线段和复制个数来实现沿矢量方向多个模型的复制。与模型的平移操作相似，首先输入两个坐标点来确定复制模型的方向和间距大小，然后会弹出“Duplicate

along line”对话框，在该对话框的“Total number”栏中输入需要复制的模型个数，此时输入的个数是包含了源模型在内的数目，如输入3是指加上源模型一共有3个模型，即沿指定矢量线段复制了两个模型，如图3-66所示；“Attach To Original Object”复选框决定了复制完成后是否将复制的模型与源模型进行合并操作，勾选/不勾选的复制效果如图3-67所示。

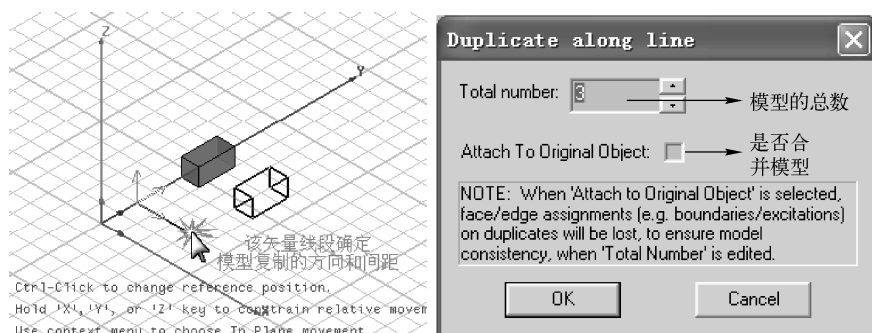
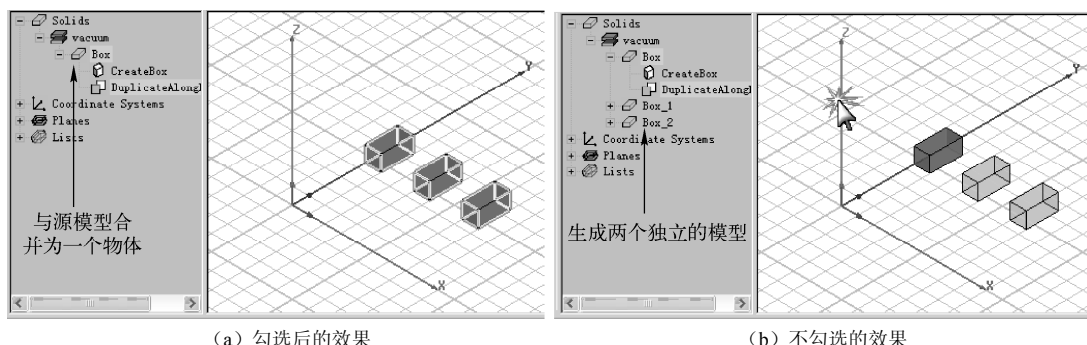


图 3-66 沿矢量方向复制模型



(a) 勾选后的效果

(b) 不勾选的效果

图 3-67 “Attach To Original Object”复选框的作用



#### 特别说明

勾选“Attach To Original Object”复选框复制模型时，源模型的激励及边界条件将不会连带复制到其他模型中，其他模型与源模型将一起作为整体共用源模型的激励和边界条件。

#### (3) Around Axis: 与轴 X、Y、Z 成一定角度复制模型。

该命令可以实现选定模型以现有坐标系为参考，以指定的角度绕 X、Y 或 Z 坐标轴进行复制，如图 3-68 所示。

与模型的旋转操作相似，可以在弹出的“Duplicate Around Axis”对话框中指定旋转轴、旋转角度、复制模型后的总数，以及勾选“Attach To Original Object”复选框进行合并操作等。

#### (4) Mirror: 镜像复制。

该命令会将选中物体复制到指定平面的镜像位置，它与模型的镜像移动命令相似，此处



不再详细介绍。

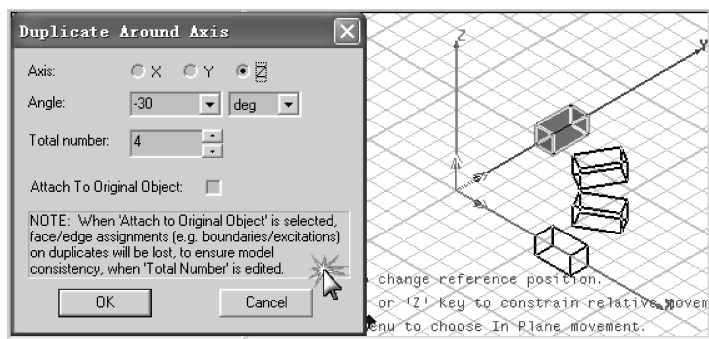


图 3-68 沿 Z 轴旋转复制模型

### 3. 模型的缩放

改变物体模型的大小尺寸可以通过以下两个命令来实现。

(1) Offset (偏移量): 将三维模型的各个面沿着各自的法向方向移动指定的距离, 可以生成新的模型。首先选中要变换的物体模型, 然后选择“Edit→Arrange→Offset”命令, 在弹出的“Offset”对话框(如图 3-69 所示)中输入偏移量数值。如果偏移量为正, 则模型的各个平面沿其外法线方向移动, 即增加了模型的尺寸; 如果偏移量为负, 则模型的各个平面沿其内法线方向平移, 即模型尺寸相应地减小。举例来说, 如果输入 5mm, 则表示三维模型中的每一个平面沿各自的外法线方向在原来的基础上同时增加 5mm; 如果输入-5mm, 模型尺寸则相应减小 5mm。

(2) Scale (比例): 将选中的模型按照指定的比例进行缩放, 该命令允许模型在 X、Y、Z 方向以不同的比例进行缩放。选中相应的物体模型, 执行“Edit→Scale”命令, 在弹出的“Scale”对话框中分别指定模型在 X、Y、Z 坐标轴方向的缩放比例, 如图 3-70 所示。

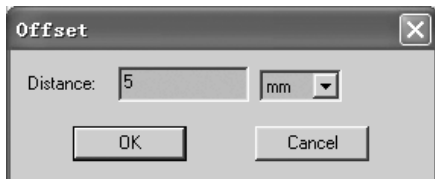


图 3-69 模型缩放中的“Offset”对话框

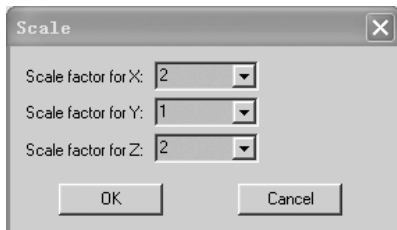


图 3-70 模型缩放中的“Scale”对话框

### 3.9.2 边缘切削


工程设计中的物体棱边, 特别是物体内部的棱边经常需要进行切削处理, 为了仿真这类模型, HFSS 提供了两种切削操作命令, 分别是“Fillet (圆角)”命令和“Chamfer (倒角)”命令。





## 1. Fillet（圆角）操作

Fillet（圆角）操作是指将选取的三维模型的棱边修改成圆弧。

首先选取三维模型的一条棱边，然后选择“Modeler→Fillet”命令或单击工具栏中的快捷图标按钮，在弹出的“Fillet Properties”对话框中输入修改后的圆弧半径，单击“OK”按钮确定执行，如图 3-71 所示。

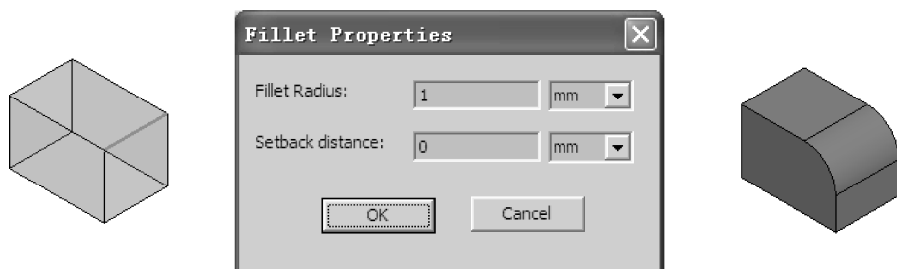


图 3-71 模型棱边的圆角操作

HFSS 允许同时选取多条棱边进行圆角操作，当多条棱边相连时，圆角半径越大，连接处就越光滑。不同圆角半径时的模型效果如图 3-72 所示。

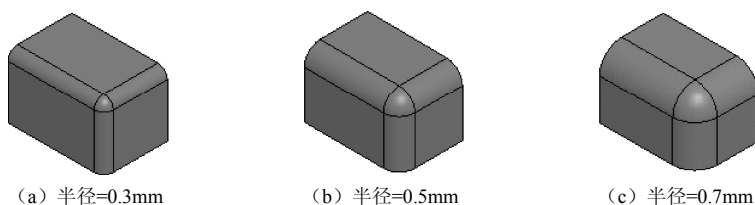



图 3-72 不同圆角半径时的模型效果

## 2. Chamfer（倒角）操作

Chamfer（倒角）操作是指将选取的三维模型的棱边修改成斜角。

首先选取三维模型的一条棱边，然后选择“Modeler→Chamfer”命令或单击工具栏中的快捷图标按钮，在弹出的“Chamfer Properties”对话框中输入斜角距离所选棱边的距离，单击“OK”按钮确定执行，如图 3-73 所示。

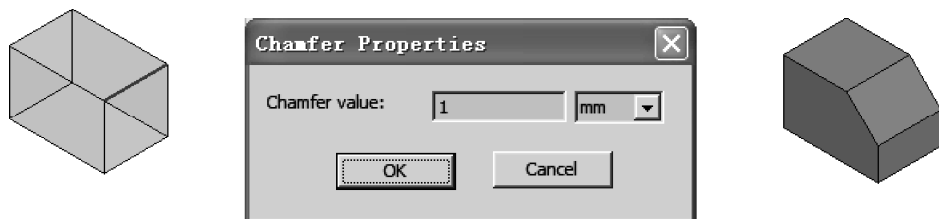


图 3-73 模型棱边的倒角操作

HFSS 允许同时选取多条棱边进行倒角操作。


### 3.9.3 布尔运算

基本的布尔运算主要有以下几种。

- (1) Unite (相加): 多个模型相加。
- (2) Subtract (相减): 从一个模型中减掉与其他模型相交的部分。
- (3) Intersect (相交): 提取多个模型相交的部分。
- (4) Split (分裂): 将模型沿选定坐标平面分开。
- (5) Sweep (扫描): 将选定的工具线、面结构沿特定路径扫描, 构造目标面、体模型。
- (6) Connect (连接): 连接工具线、面结构, 以生成目标面、体模型。
- (7) Section (截面): 生成三维模型在指定坐标轴平面上的二维截面。

为了创建复制的物体模型, 需要通过对基本模型进行布尔操作来实现。HFSS 的布尔运算命令包含在主菜单栏中的“Modeler→Boolean”子菜单中, 共有 Unite (合并)、Subtract (相减)、Intersect (相交) 和 Split (分裂) 四组命令, 下面通过简单的实例对它们进行介绍。

#### 1. 合并操作

合并操作是指将选中的多个物体模型相加生成一个新的模型。首先选中需要合并的所有物体模型, 然后选择“Modeler→Boolean→Unite”命令或单击工具菜单栏中的快捷图标按钮执行合并操作。HFSS 在进行合并操作时, 第一个选择的对象会被认为是标准材料, 因此合并命令完成后, 新的模型属性(名称、材料、颜色、透明度等)与合并前第一个选中的模型属性保持一致。合并操作如图 3-74 所示。

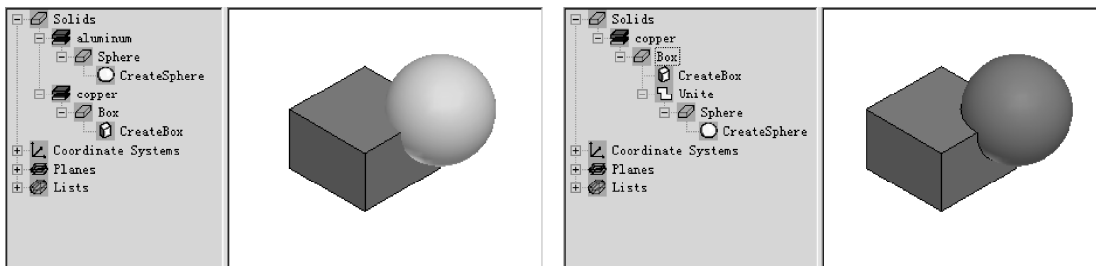


图 3-74 合并操作



#### 特别说明

合并操作并不只限于有接触的物体, 彼此不相交的模型也可以进行合并操作, 这样可以实现对同一类模型的整体编辑和处理。关联的物体合并后不再关联, 分离的物体合并后仍然分离, 属性统一为第一个选中的物体模型的属性。

#### 2. 相减操作

相减操作实现的是将一个物体从另外一个物体中减去, 得到的剩下的模型作为一个新的物体模型。首先选择被减物体模型(只能有一个), 然后同时选中需要减去的物体模型(可


以是多个), 执行“Modeler→Boolean→Subtract”命令或单击工具菜单栏中的快捷图标按钮, 在弹出的“Subtract”对话框(如图 3-75 所示)中利用“-->”和“<--”按钮将被减的模型放在空白(Blank Parts)栏中, 将要减去的模型放在工具(Tool Parts)栏中, 如果勾选“Clone tool objects before subtracting”复选框, 被减去的模型将被复制并保留; 如果不勾选该复选框, 则被减模型将消失。最后单击“OK”按钮执行操作。长方体减去球体的效果如图 3-76 所示。



图 3-75 “Subtract”对话框

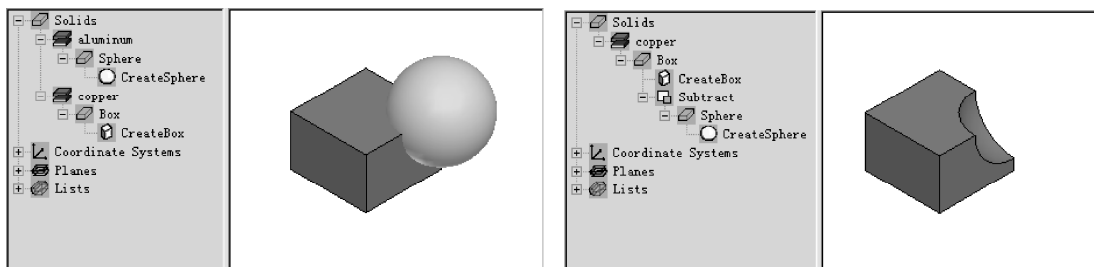



图 3-76 长方体减去球体的效果



#### 特别说明

在相减操作中, 如果勾选了“Clone tool objects before subtracting”复选框, 命令执行后, 模型的外观显示效果并没有什么明显变化, 不同的是之前两个物体模型是相交的状态, 之后两个物体模型则不再相交。

### 3. 相交操作

相交(Intersect)操作是指提取多个物体模型的公共部分生成一个新的模型。与 Unite 操作一样, 新模型的属性与第一个选中的模型一致。首先选中参与操作的多个物体模型, 然后执行“Modeler→Boolean→Intersect”命令, 或单击工具栏中的快捷图标按钮执行相交操作。长方体与球体相交操作如图 3-77 所示。

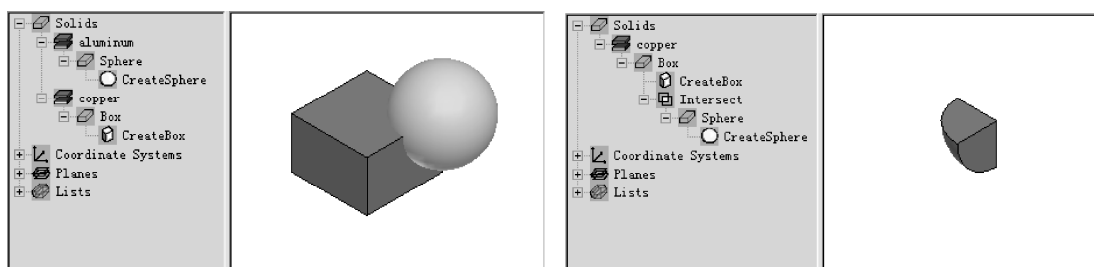


图 3-77 长方体与球体相交操作

#### 4. 分裂操作

分裂 (Split) 操作是指将模型沿三大主平面 (XY、YZ、XZ) 分成两部分, 并选择同时保留还是只保留其中某一侧的部分。“Split”对话框及分裂后的圆锥模型如图 3-78 所示。

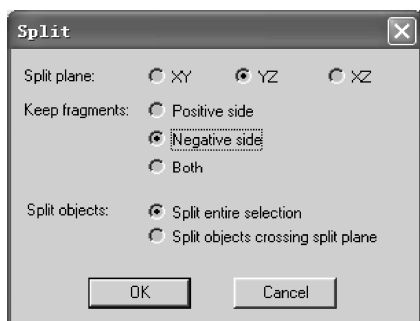


图 3-78 “Split”对话框及分裂后的圆锥模型

“Split”对话框中各选项的含义如下。

(1) Split plane: 指定分裂平面, 这里一共有 XY、YZ、XZ 三个主平面供用户选择。

(2) Keep fragments: 选择保留部分, 其中“Both”表示分裂的两部分将全部保留, 仅仅将模型分成两部分而已; “Positive side”和“Negative side”是相对所选分裂平面的正方向和负方向, 如果选择分裂平面为 XZ 平面, 则“Positive side”指的是 Y 轴的正方向, 而“Negative side”指的是 Y 轴的负方向。

(3) Split objects: 选择分裂操作的作用对象。其中“Split entire selection”表示只对选中的模型进行分裂操作; 而“Split objects crossing split plane”表示对穿过分裂平面的所有模型物体进行分裂操作。



#### 特别说明

大多数的布尔运算都有一个标准模型, 默认为第一个选中的模型, 其属性将被保留。同时, HFSS 软件提供了在进行布尔运算之前进行复制工具模型的选项, 用户可以通过选择主菜单栏中的“Tool→Option→Modeler Option”命令中的“3D Modeler Options”对话框, 勾选“Operation”选项卡中的“Clone”栏中的复选框来进行设置。



## 3.10 模型的显示

### 3.10.1 模型的查看与浏览

关于模型的查看及相关设置全部包含在主菜单栏的“View”下拉菜单中，主要包括以下相关的命令。

(1) View→Modify Attributes: 该子菜单中的命令有以下几个。

- ① Orientation: 内置/自定义查看角度。
- ② Lighting: 控制灯光的颜色、角度、强度。
- ③ Projection: 控制透视图视角。
- ④ Background Color: 控制 3D 模型的背景颜色。

(2) View→Active View Visibility: 显示控制，包括 3D 模型、颜色、背景、激励、场分布图。

(3) View→Options: 立体模式、拖动最佳化、默认颜色、默认旋转。

(4) View→Render—Wire Frame: 线框显示。

(5) View→Render→Smooth Shaded: 平滑实体显示。

(6) View→Coordinate System→Hide or Small(large): 坐标系的显示/隐藏，以及显示大坐标系/小坐标系。

(7) View→Grid Setting: 模型窗口中网格属性的设置。

由于篇幅的原因，对于每一项命令的使用，本书不再进行详细地描述，读者可以针对具体命令进行操作，以了解和掌握其用途和方法。

### 3.10.2 改变视图和视角

HFSS 主菜单栏中的“View”菜单包含所有改变视图的操作命令，包括“Rotate”、“Pan”、“Zoom”、“Zoom In”、“Zoom Out”、“Fit All”、“Fit Selection”等，这些命令在工具栏中对应的快捷方式按钮如图 3-79 所示。

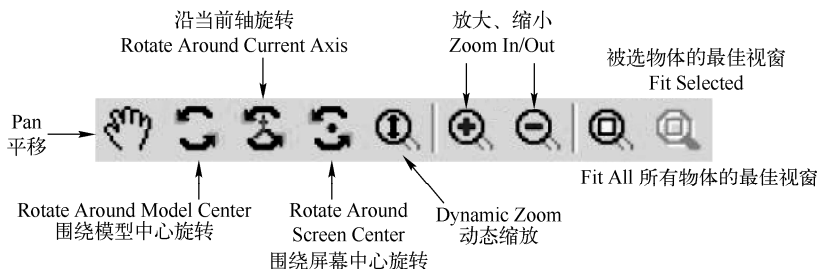


图 3-79 工具栏中的视图工具按钮

#### 1. 改变视图

利用相应命令，用户可以在需要的时候（包括创建模型的时候）任意改变视图。各命令



的具体说明如下。

(1) Pan (平移): 在模型显示窗口, 按住鼠标左键并拖动, 模型将在当前视角平面内平行移动。

(2) Rotate (旋转): 在模型显示窗口, 按住鼠标左键并拖动, 模型将会围绕坐标系旋转。

(3) Dynamic Zoom (动态缩放): 在模型显示窗口, 按住鼠标左键并上、下拖动, 模型将会相应进行放大/缩小显示。向上拖动鼠标, 模型放大显示; 向下拖动鼠标, 模型将缩小显示。要记住的是, 虽然此时模型出现了放大和缩小, 但是仅仅是视图效果, 模型的实际尺寸和结构并不发生改变。

(4) Zoom In/Out (放大/缩小): 选择此模式, 在需要放大/缩小的区域利用鼠标左键拖出一个矩形框, 则被选中的区域将会进行对应的放大/缩小显示。需要注意的是, 矩形框的大小决定了选择区域的放大/缩小因子。矩形框越小, 对应的因子倍数越大, 相反, 因子倍数越小。

用户除了可以在菜单栏和工具栏中选择调整视图的操作命令外, 还可以在模型显示窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择相应的命令进行操作。模型显示窗口中的右键快捷菜单中对应的视图命令如图 3-80 所示。

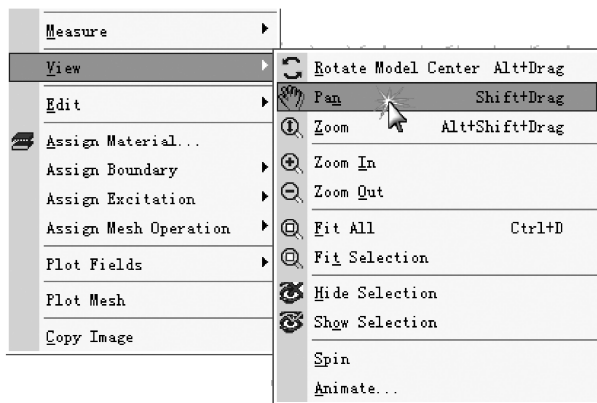


图 3-80 右键快捷菜单中对应的视图命令

## 2. 改变视角

除了通过旋转、平移操作改变视角外, HFSS 系统还提供了 9 种定义好的标准视角, 如图 3-81 所示, 分别为正视、顶视、底视、左视、右视、左上、右上、左下和右下。只要在按住键盘上的 Alt 键的同时, 在图中所示的坐标位置 (红点处) 双击鼠标, 便可以通过相应视角显示模型。

以 T 形波导为例, 按住键盘上的 Alt 键的同时, 用鼠标双击视图中不同的红点位置, 对应视图的显示效果如图 3-82 所示。

改变视角是一个经常要用到的操作, 因此记住相关快捷键组合将大大方便我们的建模工作。

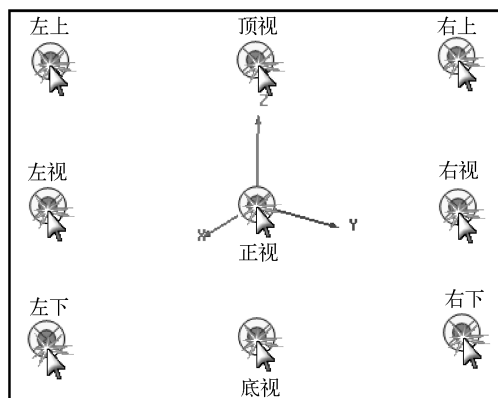


图 3-81 模型显示窗口中标准视角对应的鼠标双击位置

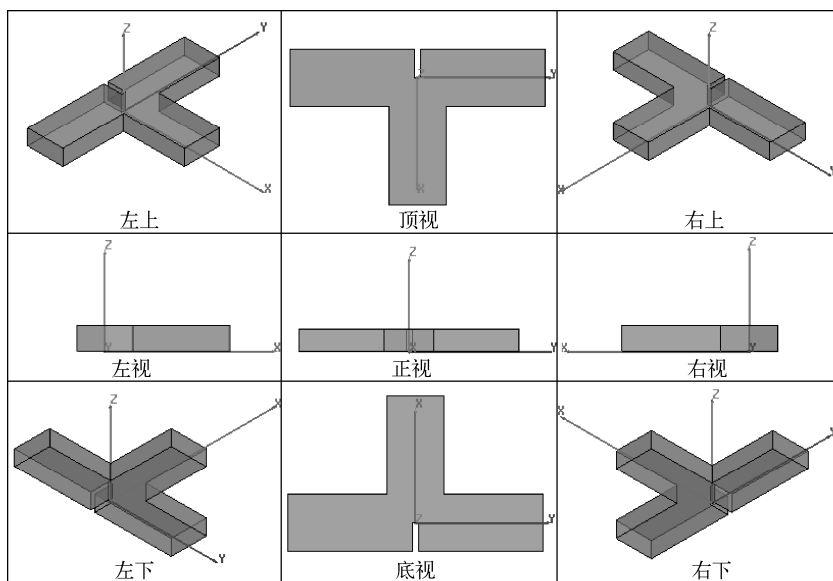



图 3-82 不同视角时 T 形波导的显示效果

### 3.10.3 物体模型的显示与隐藏

和物体模型的显示与隐藏相关的命令也位于主菜单栏的“View”菜单中，包括“Hide Selection”、“Show Selection”、“Show All”和“Active View Visibility”等，相关命令的含义已经在前文介绍“View”菜单命令时进行了说明，此处不再赘述。

在工具栏中和模型显示与隐藏对应的快捷方式按钮如图 3-83 所示。

执行主菜单栏中的“View→Active View Visibility”命令，或者直接单击工具栏中的按钮，会打开“Active View Visibility (显示/隐藏设置)”对话框，如图 3-84 所示，通过该对话框，用户可以设置物体模型、边界条件、端口激励、场分布图等显示与隐藏。在“3D Modeler”选项卡中勾选表示显示对应的物体模型，反之表示隐藏该模型。还可以在选项卡



底部的“Name”栏中输入模型的名称来改变对应模型的显示与隐藏。当输入\*号时，单击“Show”按钮会显示所有物体模型；单击“Hide”按钮，则隐藏所有物体模型。

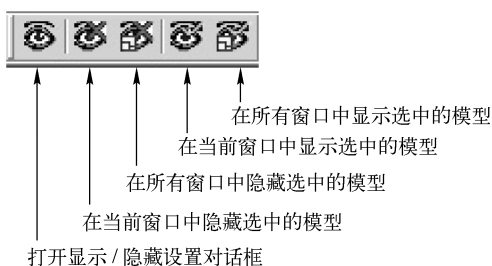


图 3-83 工具栏中对应的快捷方式按钮

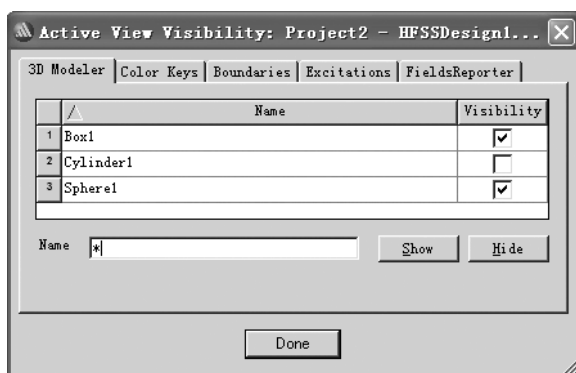


图 3-84 “Active View Visibility（显示/隐藏设置）”对话框



## 第4章 HFSS 仿真的基本设置

本章将详细介绍 HFSS 仿真分析中需要的各种基本设置的概念、作用和设置方法。HFSS 仿真的基本设置的内容包括边界条件、端口激励、材料属性、网格剖分及分析求解设置。通过本章的学习，读者将会了解到以下内容：

- (1) 不同边界条件的定义和设置方法；
- (2) 不同端口激励的定义、适用范围和设置方法；
- (3) 如何分配模型材料属性及添加自定义材料；
- (4) 自适应网格的剖分原理及如何手动设置剖分网格；
- (5) 如何添加求解设置及不同扫频模式的区别。

### 4.1 边界条件的设置

#### 4.1.1 边界条件概述

Ansoft HFSS 的仿真计算原理就是利用有限元方法求解微分形式的麦克斯韦方程。只有在场矢量和导数都是单值、有界而且沿空间连续分布的假设下，这些方程才可以使用。在边界和场源处，场是不连续的，场的导数变得没有意义。因此，需要利用边界条件确定跨越不连续边界处场的性质。边界条件对理解麦克斯韦方程是非常重要的，同时也是求解麦克斯韦方程的基础。

当边界条件被正确使用时，边界条件能够有效地用于简化模型的复杂性。事实上，Ansoft HFSS 能够自动地使用边界条件来简化模型的复杂性。对于无源 RF 器件来说，Ansoft HFSS 可以被认为是一个虚拟的原型世界。与边界为无限空间的真实世界不同，虚拟原型世界被做成有限的。为了获得这个有限空间，Ansoft HFSS 使用了背景或包围几何模型的外部边界条件。

HFSS 的边界类型有以下几种：

- (1) 理想导体边界 (Perfect E)；
- (2) 理想磁边界 (Perfect H)；
- (3) 有限导体边界 (Finite Conductivity)；
- (4) 阻抗边界 (Impedance)；
- (5) 分层阻抗边界 (Layered Impedance)；
- (6) 辐射边界 (Radiation)；
- (7) 对称边界 (Symmetry)；
- (8) 主、从边界 (Master and Slave)；
- (9) 集总 RLC 边界 (Lumped RLC)；



(10) 理想匹配层边界 (Perfectly Matched Layer, PML) 边界。

边界条件的设置方法步骤为:

(1) 选取需要设置边界条件的模型表面 (如果该模型的所有表面都需要设置边界条件, 则可以直接选取该模型体), 设置完成后软件会自动为模型的每个平面配置边界条件;

(2) 选择主菜单栏中的 “HFSS→Boundaries→Assign” 子菜单中相应的边界条件命令, 弹出对应的边界条件设置对话框;

(3) 输入边界条件的名称或默认系统名称, 输入边界条件需要指定的相关参数, 然后单击 “OK” 按钮完成边界条件的设置;

(4) 设置完成后, 边界条件将会自动添加到工程管理窗口中的 “Boundaries” 节点下, 单击鼠标左键可以查看, 双击鼠标左键可以打开属性窗口进行编辑和修改;

(5) 要想查看设计中的所有边界条件 (包括默认边界), 可以选择主菜单栏中的 “HFSS→Boundary Display” 命令。

### 4.1.2 理想导体边界

理想导体边界 (Perfect E) 是一种理想电导体或简称为理想导体, 也是 HFSS 软件的默认边界。这种边界条件的电场 (E-Field) 垂直于物体的表面, 最终的场解满足在理想导体边界电场的切向分量为零。理想导体边界表面的电场方向如图 4-1 所示。

在 HFSS 中, 在以下两种情况下, 对应模型表面将被自动定义为理想导体边界。

(1) 任何与背景相关联的物体表面将被自动地定义为理想导体边界。所谓背景是指几何模型周围没有被任何物体占据的空间。读者可以将这种几何结构想象为外面有一层很薄而且是理想导体的材料。例如, 要想仿真一个充满空气的矩形波导, 可以创建一个具有波导内腔尺寸形状, 材料特性为空气的简单物体模型, 波导模型表面就会自动被假定为良导体而且给出外部 (outer) 边界条件, 或者也可以把它变成有损导体。

(2) 任何材料属性被指定为 PEC (理想电导体) 的物体模型表面将被自动定义为理想导体边界, 并命名为 smetal 边界。选择主菜单栏中的 “HFSS→Boundary Display” 命令可以看到所有定义的边界条件。

### 4.1.3 理想磁边界

理想磁边界 (Perfect H) 是一种理想的磁边界。边界条件的磁场垂直于物体表面, 而电场平行于物体表面, 相当于理想的开路情况。理想磁边界如图 4-2 所示。



图 4-1 理想导体边界表面的电场方向



图 4-2 理想磁边界

当理想磁边界覆盖理想导体边界时, 覆盖部分相当于自然边界, 即恢复为以前的原始材料特性。它不会影响任何材料的设置。例如, 可以用这种方法在零厚度的理想导体上开孔

等。理想电、磁边界叠加效果如图 4-3 所示。

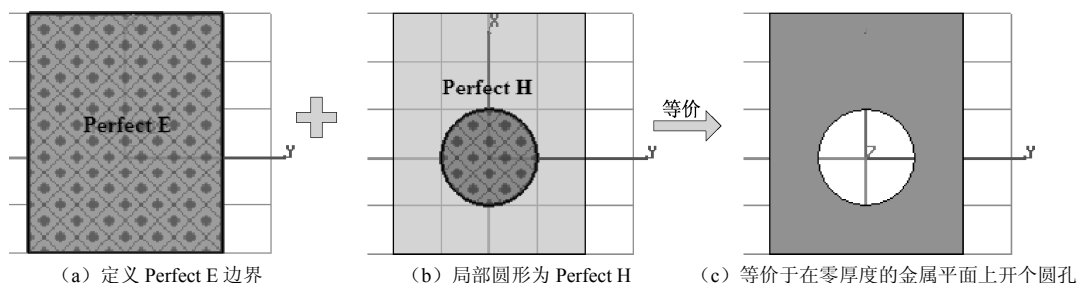


图 4-3 理想电、磁边界叠加效果

#### 4.1.4 有限导体边界

有限导体边界 (Finite Conductivity) 用来定义有耗 (非理想) 的导体表面, 等价于有耗金属材料的定义。定义有限导体边界时, 会打开 “Finite Conductivity Boundary (有限导体边界)” 对话框, 如图 4-4 所示。在该对话框中可以设置材料的电导率和相对磁导率, 也可以通过选择 “Use Material” 选项, 直接选择材料库中的材料来实现, 如铝、铜、银等。

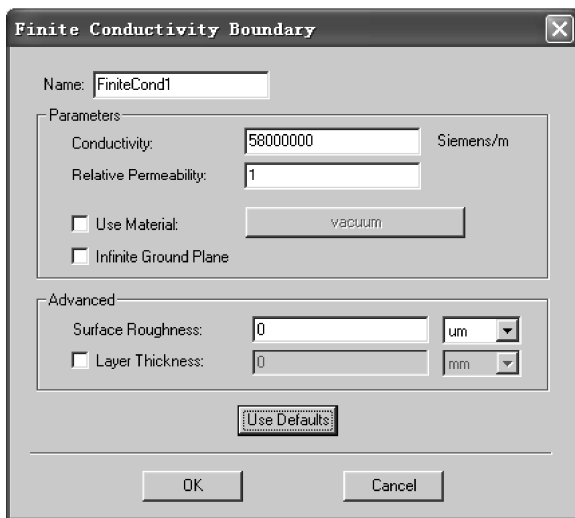


图 4-4 “Finite Conductivity Boundary (有限导体边界)” 对话框

在 “Finite Conductivity Boundary” 对话框中, 各选项的含义如下。

- (1) Conductivity: 材料的电导率, 单位为西门子/米 (Siemens/meter)。
- (2) Relative Permeability: 相对磁导率。

计算的损耗是频率的函数, 它仅能用于良导体损耗的计算。也就是说, 在给定频率时, 导体的厚度要比对应的肌肤深度大, 否则就需要使用分层阻抗边界来定义。其中电场切线分量为  $E_{\tan} = Z_s (\hat{n} \times H_{\tan})$ 。  $E_{\tan}$  和  $H_{\tan}$  为表面电场和磁场的切向分量;  $Z_s$  为表面阻抗, 可表示为



$Z_s = (1 + j)/(\delta\sigma)$ ，其中 $\delta$ 是有耗导体的趋肤深度，导体的趋肤深度为 $\delta = \sqrt{2/(w\sigma\mu)}$ ， $w$ 是激励电磁波的角频率， $\sigma$ 是导体的电导率， $\mu$ 是导体的磁导率； $\hat{n}$ 是表面法向单位矢量。

“Infinite Ground Plane”复选框表示是否需要将该边界设置为无限大地平面边界。

### 4.1.5 阻抗边界

阻抗边界是一个用解析公式计算电场特性和损耗的电阻性表面，用来模拟已知阻抗值的电阻性表面，如用阻抗边界来实现模型中的薄膜电阻。设置阻抗边界时，会打开“Impedance Boundary（阻抗边界）”对话框，如图 4-5 所示，在该对话框中需要用户给出单位为 ohm ( $\Omega$ )/square 的电阻值和电抗值。图中的“Infinite Ground Plane”复选框表示是否需要将该边界设置为无限大地平面边界。

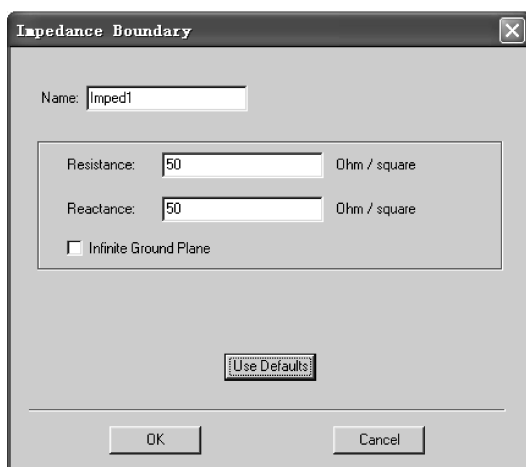


图 4-5 “Impedance Boundary（阻抗边界）”对话框

表面的阻抗 $Z_s = R_s + jX_s$ ，电场切线分量为 $E_{\tan} = Z_s(\hat{n} \times H_{\tan})$ ，其中 $R_s$ 是以 $\Omega/\text{square}$ 为单位的电阻， $X_s$ 是以 $\Omega/\text{square}$ 为单位的电抗。

### 4.1.6 分层阻抗边界

分层阻抗边界用于将具有不同阻抗特性的多层结构整合为一个与阻抗边界一样的阻抗表面，不同之处是分层阻抗边界是通过设置的分层结构参数计算物体的表面阻抗特性的，包括分层结构数据和表面粗糙度。“Layered Impedance Boundary（分层阻抗边界）”对话框如图 4-6 所示。

分层结构的阻抗计算是根据传输线理论推导而来的，不同层的输入阻抗可按照以下公式计算：

$$Z_{ink} = Z_{wk} \frac{Z_{in(k+1)} \text{ch}(\gamma_k d_k) + Z_{wk} \text{sh}(\gamma_k d_k)}{Z_{in(k+1)} \text{sh}(\gamma_k d_k) + Z_{wk} \text{ch}(\gamma_k d_k)}$$

式中,  $Z_{ink}$  为第  $k$  层的输入阻抗;  $Z_{wk} = \sqrt{\frac{u_0 u_{rk}}{\epsilon_0 u \epsilon_{rk}}}$ ;  $\text{ch}$  为双曲余弦函数;  $\text{sh}$  是双曲正弦函数;  $d_k$  为第  $k$  层的厚度;  $\gamma_k = k_0 \sqrt{\epsilon_{rk} u_{rk}}$  为第  $k$  层的传播系数, 其中  $k_0$  为自由空间的波束,  $\epsilon_{rk}$  为第  $k$  层的相对介电常数,  $u_{rk}$  为第  $k$  层的相对磁导率。

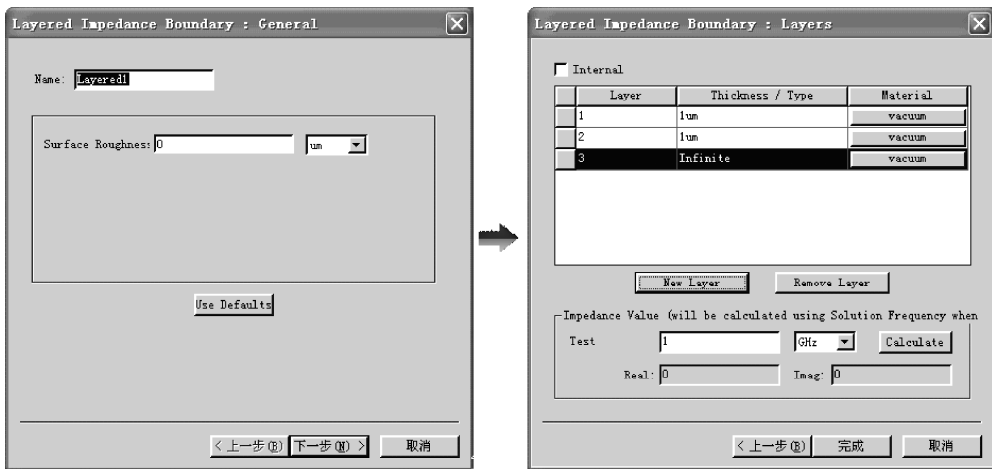


图 4-6 “Layered Impedance Boundary (分层阻抗边界)” 对话框



#### 特别说明

如果在物体模型的最外层设置分层阻抗边界, 就不必勾选 “Layered Impedance Boundary (分层阻抗边界)” 对话框中的 “Internal” 复选框; 反之, 如果分层阻抗边界定义在物体模型内部表面, 则需要勾选 “Internal” 复选框。然后设置分层结构的层数、每层的厚度和每层的材料, 其中通过 “New Layer” 和 “Remove Layer” 两个按钮可以灵活地添加和删除分层结构的层数。对话框下半部分的 “Impedance Value” 栏可以方便用户随时计算设置的分层结构的阻抗。

### 4.1.7 辐射边界

辐射边界也称为吸收边界。由于有限元方法求解辐射问题时需要截断问题区域, 以使求解区域有限化, 所以需要在截断区域设置吸收边界来模拟开放的空间。系统在辐射边界处吸收电磁波, 本质上就可把边界看成延伸到空间无限远处。辐射边界可以是任意形状并且靠近结构, 但一般要距离模型四分之一波长。对包含辐射边界的结构, 计算的  $S$  参数包含辐射损耗。当设置了辐射边界后, 就可以进一步计算与远区场相关的参数, 如天线的增益、方向性、圆极化轴比等。

### 4.1.8 对称边界及阻抗倍乘器的使用

在 HFSS 中利用理想电壁或理想磁壁对称面来定义对称结构, 就可以只创建结构的一部

分来模拟整个模型特性，从而降低了模型的复杂度，节省了求解时间。

对称边界主要有以下两种类型。

(1) 理想电壁对称面：针对电场垂直于对称面的情况。

(2) 理想磁壁对称面：针对磁场垂直于对称面的情况。

具体使用时，还要遵循以下原则：

(1) 对称面必须与背景关联；

(2) 在三维模型中，对称面不能穿过物体模型；

(3) 对称面必须定义在平面上；

(4) 对称面的总数不能超过三个，而且必须相互正交。

当对称面经过定义过的端口时，还必须对阻抗倍乘器（Impedance Multiplier）进行设置，否则将导致与完整端口阻抗不一致的情况发生。

对于阻抗倍乘器的原理，可以从端口阻抗  $Z_{pu}$  的计算上来理解。 $Z_{pu}$  是由功率（ $P$ ）和电压（ $U$ ）的值计算得到的：

$$Z_{pu} = \frac{U \cdot U}{P}$$

对于完整的端口，如图 4-7（a）所示，该式中的功率和电压直接由场计算得到；但定义了对称面以后，完整的结构通常会被分成两部分或四部分等，这样端口场的电压或功率将会发生变化，从而导致推算的阻抗与完整的端口不同。

如图 4-7（b）所示，当结构被理想导体对称面分成两部分时，端口处只有一半的电压差和一半的能流被计算，即  $Z'_{pu} = \frac{(U/2) \cdot (U/2)}{(P/2)} = Z_{pu} / 2$ ，此时计算得到的阻抗只是完整时的一半。因此，在这种情况下，阻抗倍乘器的值需要定义为 2。

如图 4-7（c）所示，当结构被理想磁体对称面分成两部分时，端口处只有一半的能流被计算，但是可以得到完整的电压差，即  $Z'_{pu} = \frac{U \cdot U}{(P/2)} = 2 \cdot Z_{pu}$ ，此时计算得到的阻抗是完整时的 2 倍。因此，在这种情况下，阻抗倍乘器的值需要定义为 0.5。

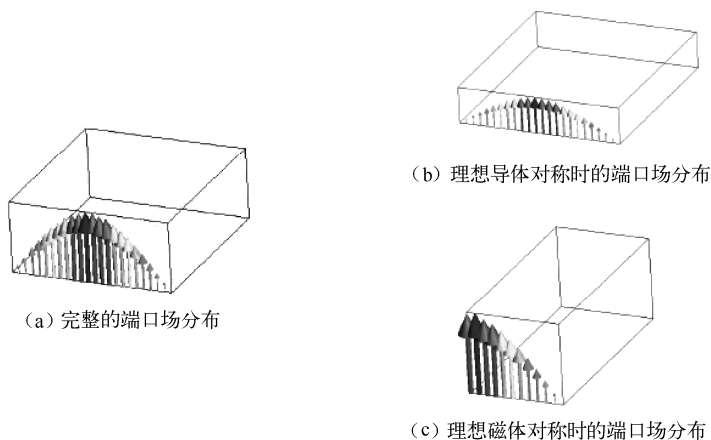


图 4-7 不同对称边界条件下端口的场分布

知道了阻抗倍乘器的计算原理，就可以根据具体情况计算端口阻抗并设置阻抗倍乘器的倍数了。在一般情况下，阻抗倍乘器有以下值：

- (1) 采用理想导体对称平面时，其值为 2；
- (2) 采用理想磁体对称平面时，其值为 0.5；
- (3) 如果模型具有 E 面和 H 面对称边界时，则需要做相应的调整。

以主模传输的矩形波导为例，完整波导结构的场分布如图 4-9 (a) 所示。对于这种结构，可以使用两种对称面来简化模拟：一个利用左右对称；另一个利用上下对称。首先将模型按照左右或上下对称进行分离并只保留其中一半的结构，再选中分离处平面，然后执行添加对称边界命令 (Symmetry...)，打开如图 4-8 所示的“Symmetry Boundary (对称边界)”对话框，

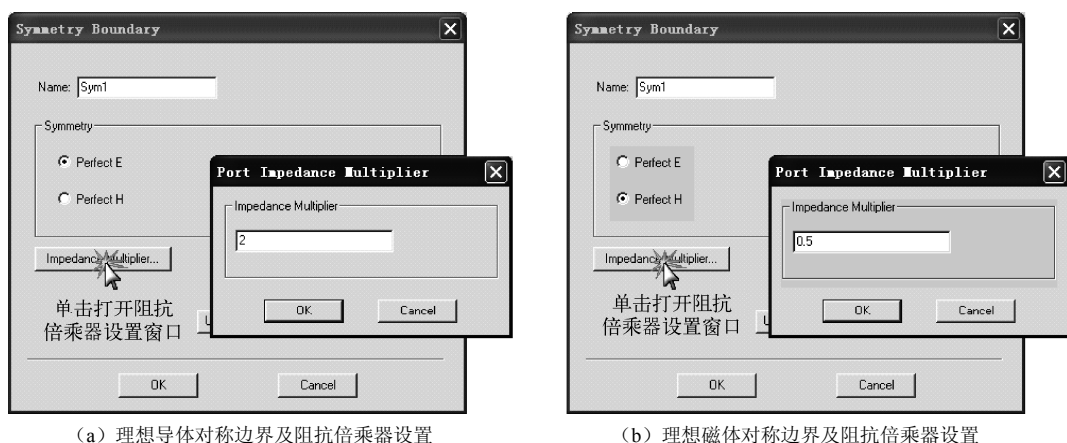


图 4-8 “Symmetry Boundary (对称边界)”对话框

左右对称时，磁场垂直于对称面，因此将对称面设置为理想磁壁，效果如图 4-9 (b) 所示；上下对称时，电场方向垂直于对称面，因此将对称面设置为理想电壁，效果如图 4-9 (c) 所示。

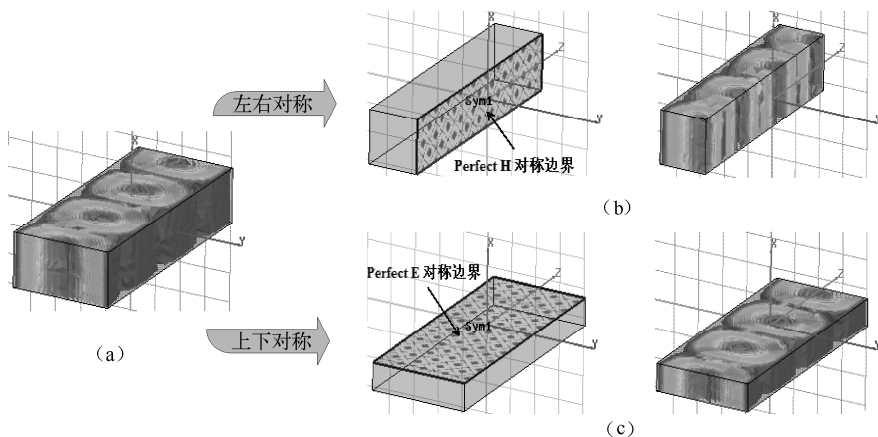


图 4-9 矩形波导对称边界的设置

**特别说明**

不是只要几何结构对称就可以使用对称边界，还必须满足场分布对称条件。

### 4.1.9 主、从边界

**主、从边界 (Master & Slave):** 由主边界 (Master) 和从边界 (Slave) 两种边界共同构成，也称为关联边界，可以模拟周期结构模型，这种结构表面的一侧与另外一侧的电场之间有相位差。这种边界条件强制使边界上每个点的电场与主边界上相应点的电场相差一个相位差。

这类边界对于模拟无限阵列结构是很有用的。与对称边界不同，它对电场方向没有特殊要求，只需要满足两个边界上的场具有相同的幅度和方向即可。

设置主、从边界需要遵循以下原则：

- (1) 主、从边界只能定义在平面上；
- (2) 主、从边界上的几何结构必须匹配，否则求解就会失败。

要想建立一个主或从边界，必须制定坐标系来说明所选表面所处的平面。当两边界匹配时，相应的坐标系也必须相互匹配。

### 4.1.10 集总 RLC 边界

**集总 RLC 边界**是通过一组并联的电阻、电感和电容来模拟物体模型表面的阻抗特性的。这种边界类似于阻抗边界，不同的是用户不指定边界的具体阻抗值，而由 HFSS 软件利用用户提供的 R、L 和 C 值计算出以 ohm/square 为单位的阻抗值。

设置集总 RLC 边界时，在如图 4-10 所示的“Lumped RLC Boundary (集总 RLC 边界)”对话框中勾选“Resistance”、“Inductance”和“Capacitance”复选框并输入相应的集总电阻、电感和电容值。图中的“Current Flow Line”项用来定义电流的方向。

设置完成后，HFSS 会根据图 4-11 所示结构计算集总 RLC 电路的阻抗并将其赋予模型表面，作为表面阻抗。

### 4.1.11 理想匹配层边界

**理想匹配层边界 (Perfectly Matched Layer, PML)**是一个假设的材料边界。假设的材料边界为各向异性的，能够完全吸收电磁场。有以下两种形式的 PML。

一种是自由空间截断，此时意味着电磁场可以从这个表面无损耗地向自由空间的任意方向辐射。在这种情况下，PML 边界要比 Radiation 边界更合适，因为 PML 边界可以和模型距离很近，从而减少了问题的求解区域，缩短了计算时间。

另一种 PML 边界是反射终止，它类似于一个波导的吸收负载，可以模拟波导结构均匀地延伸到无限远。



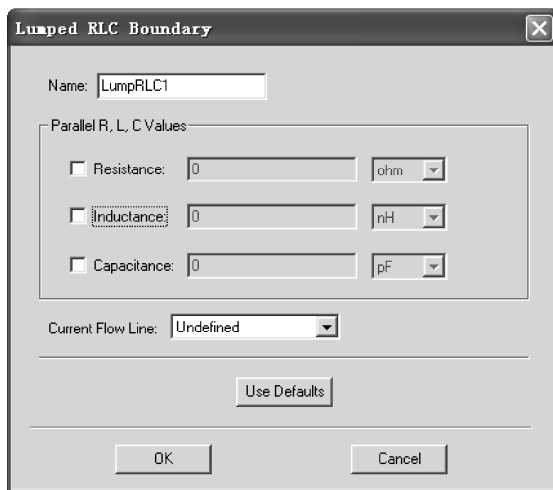


图 4-10 “Lumped RLC Boundary (集总 RLC 边界)”对话框

具体设置步骤将在后续章节中结合具体实例进行详细的介绍。

#### 4.1.12 无限地平面

通常，地面可以看成无限的、理想电壁、有限导体或阻抗边界条件。如果结构中使用了辐射边界，无限大地面将作为能量的屏蔽器，其作用是将问题区域分为整个模型所在的上半区域和辐射场都为零的下半区域，以防止波穿过地平面传播。为了模拟无限大地平面的效果，在我们定义理想导体边界、有限导体或阻抗边界条件时，可勾选无限大地平面（Infinite Ground Plane）复选框。

定义无限大地平面时，需要满足以下条件：

- (1) 模型中的无限地平面必须与背景关联；
- (2) 只有平面才能定义无限大地平面边界；
- (3) 无限大地平面和对称平面的总数不能超过 3 个；
- (4) 所有的无限大地平面和对称平面必须相互垂直。

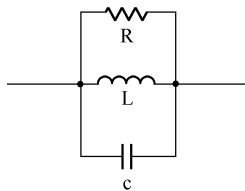


图 4-11 集总 RLC 电路

## 4.2 激励类型与设置

对于 Ansoft HFSS 的激励设置，就是在仿真模型或其表面上定义电磁场、电荷、电流或电压，以模拟实际工程应用情况下，模型的各种性能指标。HFSS 软件提供了多种形式的激励类型，包括波端口（Wave Port）激励、集总端口（Lumped Port）激励、Floquet 端口激励、差分对激励、磁偏置源激励、入射波（Incident Wave）激励（包括平面波、柱面波、线天线波、高斯波束波、赫兹-偶极子波、近、远场激励波）。

用户可以通过主菜单栏中的“HFSS→Excitations→Assign”中的子菜单进行选择（如图 4-12 所示），或者在显示窗口单击鼠标右键，在“Assign→Excitations”子菜单中选择。

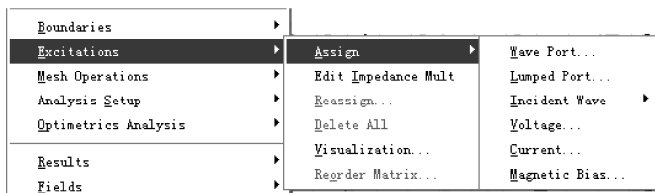


图 4-12 HFSS 中的激励类型

在 Ansoft HFSS 的微波仿真计算中，除了散射问题的求解外，与工程问题相对应，大部分仿真模型的激励源都设置在端口（Port）处，端口是计算  $S$  参数的信号输入、输出的地方，也是唯一一种允许能量进入和流出几何结构的边界。端口可以定义在一个二维物体或三维物体的表面。

下面分别介绍各种激励方式的原理和设置方法。

## 4.2.1 波端口激励

### 1. 波端口的基本定义

波端口（Wave Ports）是一种外部接口，通过传输线的方式为微波结构提供激励。HFSS 假定每个波端口连接到与端口具有相同横截面和材料特性的半无限长的波导上，在计算  $S$  参数时，假定仿真模型是由这些横截面上的简正场模式所激励的。每个波端口所产生的二维场解将以端口面上边界条件的形式为三维模型提供激励。最终的场解必须与每个端口的二维场模式相匹配。

HFSS 在每个端口分别激励产生一个解。入射到端口上的每个模式都设定含有 1W 的平均功率。当设置了多个端口时，求解过程为：首先端口 1 被 1W 的信号激励，其他端口设置为 0W，当求解计算完成后，端口 2 被 1W 的信号激励，其他端口设置为 0W，以此进行循环计算，直至所有端口都被激励一遍为止。

### 2. 使用范围

各种导波系统的输入、输出端口，包括各种形状的金属波导、微带线、同轴电缆等。波端口激励最常应用在有明显口径面的传输线结构中，如各种形状的金属波导、微带线、同轴电缆等。常用模型的波端口激励效果如图 4-13 所示。

### 3. 设置步骤

（1）创建端口平面或选取位于端口处模型的某个平面。

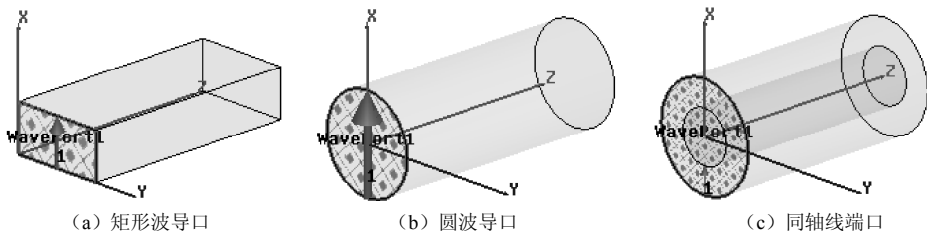


图 4-13 常用模型的波端口激励效果

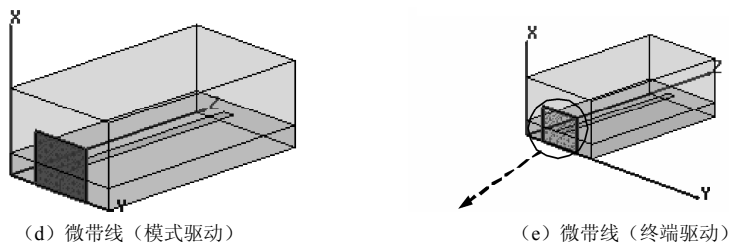


图 4-13 常用模型的波端口激励效果 (续)

(2) 在主菜单栏中选择“HFSS→Excitations→Assign”命令，或在显示窗口单击鼠标右键，在“Assign→Excitations”子菜单中选择“Wave Port”命令。

(3) 弹出“Wave Port”设置对话框，当求解类型为模式驱动时，根据需要依次设置激励名称、模式数量、积分线段、归一化阻抗值及端口平移距离，如图 4-14 所示；当求解类型为终端驱动时，将参考地的“GND”项移动到“Reference Conductors”栏中，单击“OK”按钮完成设置，如图 4-15 所示。

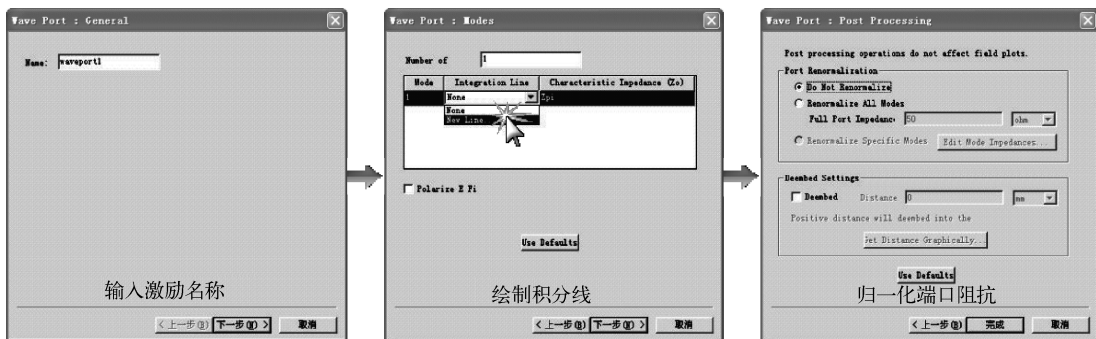


图 4-14 波端口设置步骤 (模式驱动求解)

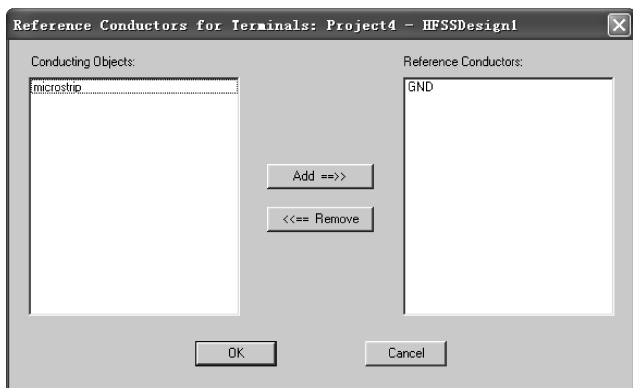


图 4-15 波端口设置步骤 (终端驱动求解)

对于像微带传输线或耦合微带线的激励，首先需要创建一个矩形端口平面作为波端口。由于波端口的四周边界相当于理想导体边界 (Perfect E)，所以对于外围是开放结构的模



型, 波端口平面要做得足够大, 以避免端口边缘与模型中的传输线产生耦合, 影响模型的特性。波端口的尺寸大小可以按照以下工程实践经验选取:

(1) 对于微带线或耦合线, 波端口宽度选为微带线宽度的 5 倍或介质高度的 3 倍, 左右对称; 当高度为介质高度的 5~10 倍时, 端口下沿不要跨越参考地平面。

(2) 对于带状线, 波端口边缘到带状线边缘的距离为线宽的 3.5 倍或介质高度的 1.5~2 倍, 左右对称, 高度与带状线上、下两个参考地平面的距离一致。

(3) 对于共面波导, 如果没有参考地平面, 波端口宽度要大于  $10g$  和  $10w$  之间的较大值, 其中  $g$  为导线两边缝隙的宽度,  $w$  为导线宽度, 高度为介质高度的 4 倍以上, 并使传输线位于端口的中央; 如果有参考地面, 则波端口的下边缘必须与参考地重合。

同时, 在上述情况中, 所创建的波端口的宽度和高度都不得超过半个工作波长, 以避免出现矩形波导模式。

为了防止端口设置不当对仿真结果的影响, 用户可以在正式求解之前先在“Solve ports only”求解模式下运行一次, 该模式只求解端口上的场分布(可以通过在求解设置的“Solution Setup”中勾选“Solve ports only”复选框来选定), 求解完成后查看端口场的分布情况, 判断是否与预想的激励一致, 如果不一致可以双击工程管理窗口中“Excitations”节点下对应的端口激励进行修改, 直到得到满足所需的激励为止, 再取消对“Solve ports only”复选框的勾选, 执行正式的仿真运算。

#### 4. 设置技巧

##### 1) 信号模式 (Modes)

对于波导或给定横截面的传输线, 存在满足给定频率下的一系列基本场模式。实际传输的场可能是这些模式的线性组合。虽然 HFSS 默认只计算场的主模, 而且在大多数情况下, 我们可以接受默认的单模模式, 但是在有些情况下也要考虑其他高次模的影响, 如下所示。

(1) 模式转换。在某些情况下, 由于几何结构类似于一个模式转换器, 所以计算中必然包括高阶模式的影响。例如, 当模式 1 (主模) 从某一结构的一个端口传输到另外一个模式为 2 的端口时, 有必要计算模式 2 下的  $S$  参数。

(2) 模式反射和传播。在单一模式的信号激励下, 三维场的解算结果中仍然可能包含由于结构不均匀引起的高次模的反射。如果这些高次模反射回激励端口, 或者传输到下一个端口, 就必须计算和这些高次模相关的  $S$  参数。如果高次模在到达任何端口前, 得到衰减(这些衰减由金属损耗或传播常数中的衰减部分所造成), 就可以不考虑这些高次模的  $S$  参数。

##### 2) 端口校准和积分线

当端口为正方形或圆形时, 端口上的电场方向都是任意的, 即在对应的波导中, 主模的电场方向可以是任意的, 此时如果不指定电场极化方向, 则部分参数的计算结果将会与期望值不一致。为了解决这一问题, 就需要在波端口使用积分线校准。每一条用于校准的积分线都具有以下特性。

(1) 阻抗: 作为一条阻抗线, 这条线用做 Ansoft HFSS 在端口对电场进行积分计算电压的积分路径。Ansoft HFSS 利用这个电压计算波端口由电压定义的端口特性阻抗。这个阻抗对广义  $S$  参数的归一化是有用的。通常, 这个阻抗指定为特定的值, 如  $50\Omega$ 。

(2) 校准：作为一条校准线，这条线明确地决定了激励信号电场的首选方向和相位值。积分线的箭头指向即为电场的正方向。需要注意的是，积分线必须位于端口的中间位置，即在对称平面上。同时还要注意以下几点：

- ① 仅在方形或圆形波导端口上指定电场极化；
- ② 确定波导的端口只由单一导体馈电（波导壁）；
- ③ 如果使用了对称边界，就不要再指定电场极化，极化会通过对称边界条件自动强制完成。



如果想要归一化特性阻抗或想观察  $Z_{pv}$  或  $Z_{vi}$  的值，就必须在端口设定积分线。

为已设波端口指定积分线的步骤如下：

- (1) 在工程管理窗口的管理树（Project Tree）中展开激励（Excitations）节点，双击要被编辑的波端口名称。
- (2) 在弹出的“Wave Port”对话框中选择模型（Modes）选项卡。
- (3) 在选项卡中为第一个模型选择积分线（Integration Line）一列，然后选择新线（New Line...），如图 4-16 所示。

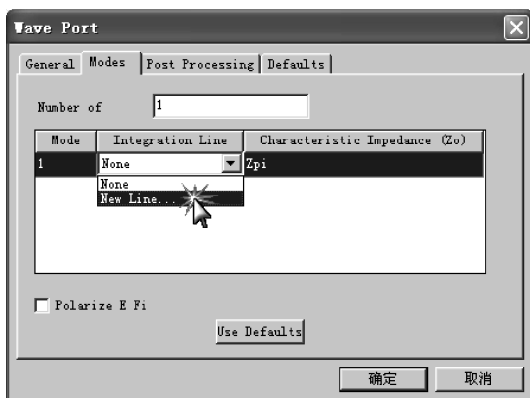


图 4-16 设置积分线时的“Wave Port”对话框

- (4) 使用下列方法中的一种进行位置和长度的设置：

- ① 直接输入线段的起点和终点相对于工作坐标系的 X, Y 和 Z 坐标；
- ② 在模型显示窗口，分别在端口上、下边缘的中心位置单击鼠标左键确定积分线的起点和终点。此时，这条线显示为矢量，指明了电场矢量的方向。如果需要改变线段的方向，则在积分线（Integration Line）一列选择切换终点（Swap Endpoints）或再选择新线（New Line）命令，设置新的积分线。

- (5) 重复（3）、（4）步，设置该端口的其他模式的积分线。

- (6) 完成积分线定义后单击“OK”按钮。

(7) 重复 (1) ~ (6) 步, 设置其他波端口的积分线。

在 HFSS11.0 之前的终端驱动模式下设置波端口时需要用户手动指定终端线, 作为电压的积分路径。手动设置对使用者提出了更高的要求, 同时也是一件费时费力的事情。于是从 HFSS11.0 版本以后, 端口终端线的设置改为系统自动设置, 用户只需要选择指定激励目标导体和参考导体就可以实现波端口的设置了。

### 3) 端口平移

HFSS 中的 Deembed 功能可以实现端口的平移操作, 可以方便地计算当端口平移到新位置后相应的  $S$  参数。端口平移操作只影响数据的后处理结果。使用 Deembed 功能将端口平移到新的位置后, 软件不需要重新进行仿真运算, 可以直接得到新的  $S$  参数。平移的距离分为正、负两种, 正数表示端口平面向模型内部移动; 负数表示端口平面向外延伸。

### 4) 端口平面

波端口必须设置在单一平面上, 而且不允许端口平面弯曲。例如, 一个几何体有一个弯曲的表面, 该表面暴露于背景中, 则这个弯曲的表面不能被定义成波端口。同时, 波端口还要求具有一定长度的均匀横截面, 这是为了保证截止模的逐渐消失, 确保仿真计算结果的准确性。如图 4-17 (a) 所示的模型结构的两端口不可以设置端口激励, 原因是在模型的两个端口都没有均匀横截面的部分。为了正确建模, 需要在每个波端口处添加一段均匀横截面的传输线, 如图 4-17 (b) 所示, 此时在模型的两个端口便可设置正确的波端口激励了。

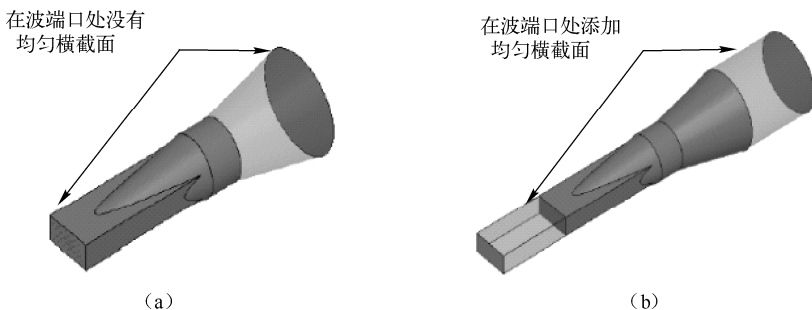


图 4-17 波端口需要一定长度的均匀横截面

均匀横截面部分的长度必须足够长, 只有这样才能保证截止模式逐渐消失, 以保证仿真结果的精确。如果波在  $Z$  方向上传播, 模式的衰减可以用函数  $e^{-\alpha z}$  来表示。因此, 所需的距离 (均匀端口长度) 由模式的传播常数值决定。例如, 如果某个截止模式的信号由于损耗需要大约经过  $1/8$  波长的距离才能逐渐消失了, 则需要构造一个长度为  $1/8$  波长的均匀波导段, 否则仿真结果中一定会包含高次谐波的影响。

在端口处附近的不连续性同样可以使截止模式传播到端口。如果端口放置在很靠近不连续性处, 端口处的边界条件会导致仿真结果与对应的真实值不同 (即系统迫使每一个端口都是要求求解模式的线性叠加)。截止模式中的能量传播到端口将会影响主模的能量并产生错误的结果。

当端口长度设置正确时, 在端口处仿真的模为理想匹配, 如同波导延伸至无穷远处一般。对于仿真中没有包含的模, 波端口可被看成理想导体。



## 4.2.2 集总端口激励

### 1. 集总端口的定义

集总端口类似于传统的波端口，但它可以定义在模型内部并可自定义复阻抗。集总端口在端口处直接计算  $S$  参数。仿真微带结构模型时常采用集总端口。集总端口可以在一个矩形上定义，从矩形的一条边沿某一路径到地板，或者像传统波端口那样，定义在暴露于背景的平面上，还可以设置在模型的内部，但不支持端口 Deembed（平移）功能。

### 2. 使用范围

集总端口最常使用在仿真微带结构模型中。微带天线中集总端口的设置如图 4-18 所示。

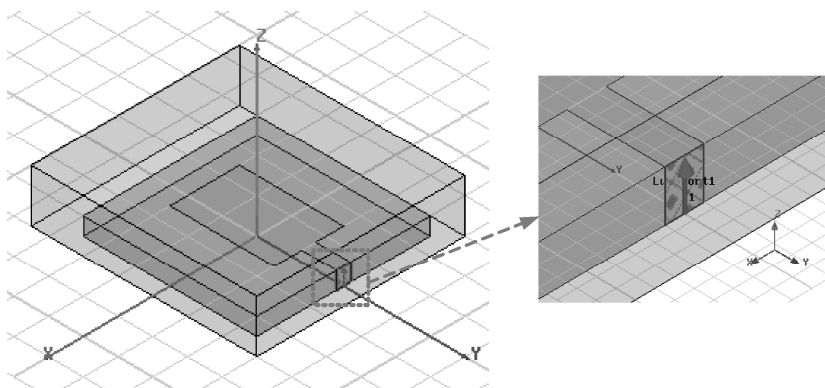


图 4-18 微带天线中集总端口的设置

### 3. 集总端口激励的设置

集总端口激励的设置与波端口激励的设置过程基本一样，这里不再赘述，在后续章节中将结合应用实例详细介绍。

集总端口激励可以视为在给定的位置，以指定的阻抗对电路施加激励。因此，在设置集总端口时，可以在电磁场集中的地方设置一个包括信号线和地线的二维端口，并定义积分线和阻抗。在设置集总端口激励时还需要注意以下几点：

- (1) 创建的集总端口长、宽尺寸要远远小于工作波长；
- (2) 指定的积分线两端必须与理想导体边界或金属表面相连；
- (3) 多个集总端口的边缘不能相连；
- (4) 在一个仿真设计中集总端口激励可以与波端口激励混合设置；
- (5) 集总端口激励只能用于 TEM 模式或准 TEM 模式，不可用于波导等非 TEM 模式的传输线中。

## 4.2.3 Floquet 端口激励

从 HFSS 11.0 版本以后，激励设置中增加了 Floquet 端口激励。Floquet 端口凭借其强大的功能，大大方便了平面相控阵、频率选择表面（FSS）等二维周期结构的仿真设计。与波



端口的求解方式一样, Floquet 端口求解的反射和传输系数能够以  $S$  参数的形式显示。使用 Floquet 端口激励并结合周期性边界, 能够像传统的波端口激励一样轻松地分析周期性结构的电磁特性, 从而避免了场求解及其复杂的后处理过程。此外, Floquet 端口允许用户指定端口处入射波的斜入射角和极化方式, 然后从求解结果中选择关心的极化分量。二维周期结构可以看做由一个个相同的单元组成。使用 Floquet 端口和主、从边界条件分析二维周期结构时, 用户只需要提取其中一个单元, 然后建模仿真, 即可得到整个二维周期结构的电磁特性。关于 Floquet 端口激励的设置将在后续章节中针对具体的仿真实例进行介绍。

用户需要注意的是, 在 HFSS 11.0 版本中, Floquet 端口还有如下限制:

- (1) 只有模式驱动求解类型的设计可以使用 Floquet 端口;
- (2) Floquet 端口不支持快速扫频方式, 可以支持离散扫频和插值扫频方式;
- (3) Floquet 端口的四周必须与主、从边界相连。

#### 4.2.4 入射波激励

入射波激励是一种虚拟的对模型进行照射的电磁波激励, 它允许使用者设置朝向某一特定方向传播的电磁波, 其等相位面与传播方向垂直, 入射波照射到模型表面的夹角称为入射角。它常用于解决各种电磁散射问题, 如雷达反射截面 (RCS) 的计算、频率选择表面 (FSS) 的分析等。HFSS 软件为用户提供了 7 种不同类型的入射波激励方式, 这些入射波分别为 Plane Wave (平面波), Cylindrical Wave (柱面波), Linear Antenna Wave (线天线波), Gaussian Beam (高斯波束波), Hertzian-Dipole (赫兹-偶极子波), Near Field Wave (近场波) 和 Far Field Wave (远场波)。下面分别介绍这 7 种入射波的定义和用法。用户可以根据自己的需要选择入射波形式。

##### 1. 平面波激励

平面波是沿某一方向上传播的波, 其等相位面与传播方向垂直。平面波入射到模型上的角度称为入射角, 对应的入射波方程可以表示为  $E_{\text{inc}} = E_0 e^{-jk_0(\hat{k} \cdot \vec{r})}$ , 其中  $E_{\text{inc}}$  表示入射波,  $E_0$  是电场矢量,  $k_0$  是自由空间波数,  $\hat{k}$  为单位传播矢量,  $\vec{r}$  是方向矢量, 且有  $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$ 。

##### 2. 柱面波激励

柱面波用来模拟放置在原点上无限大线电流的远场波照射时的情况。

##### 3. 线天线波激励

线天线波激励用来模拟放置在原点上线天线的远场波照射时的情况。

##### 4. 高斯波束波激励

高斯波束波激励用来模拟沿一个方向传播并且在垂直于传播方向上满足高斯分布的波照射时的情况。

##### 5. 赫兹-偶极子波激励

该激励可以定义为一个电偶极子或一个磁偶极子, 用来模拟放置在原点上小偶极子天线的场。





## 6. 近场波激励

这种激励可以使用从其他 HFSS 文件中导出的仿真结果。近场波激励指的是激励源距离天线非常近，其典型值为小于一个波长或更小，以致发生近场效应。近场波趋向于凋落波，是各向异性的。

## 7. 远场波激励

这种激励可以使用从其他 HFSS 文件中导出的仿真结果。作为激励的仿真结果是在距离天线足够远处的波，近似于平面波，几乎是各向同性的。

### 4.2.5 电压源激励

电压源激励定义在两层导体之间的平面上，用理想的电压源作为该平面上的电场激励。定义电压源时，在弹出的如图 4-19 所示的“Voltage Source（电压源）”对话框中需要设置的参数有电压源名称、电压幅度、相位和电场的方向。

使用电压源激励时，需要注意的有：

（1）电压源所在的平面的最大边长必须远小于工作波长，且平面上的电场是恒定电场；

（2）电压源是理想的源，没有内阻，因此后处理中不会计算  $S$  参数。

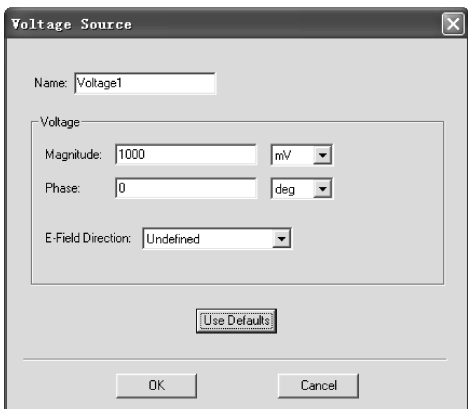


图 4-19 “Voltage Source（电压源）”对话框

### 4.2.6 电流源激励

电流源激励定义在导体表面或导体表面的缝隙上。定义电流源时，在弹出的如图 4-20 所示的“Current Source（电流源）”对话框中需要设定的参数有电流源名称、导体表面/缝隙的电流幅度、相位和方向。

使用电流源激励时，需要注意的有：

（1）电流源所在的平面/缝隙的最大边长必须远小于工作波长，同时电流是恒定的；

（2）电流源是理想的源，没有内阻，因此不需要计算  $S$  参数。

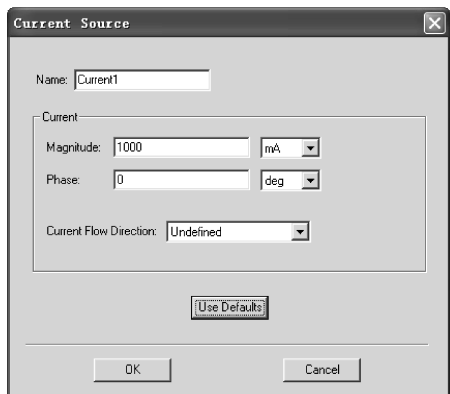


图 4-20 “Current Source（电流源）”对话框

### 4.2.7 磁偏置源激励

当创建一个铁氧体材料时，需要通过设置一个磁偏置激励来定义铁氧体材料网格的内部偏置场。这个偏置场使得铁氧体中的磁性偶极子规则排列，产生一个非零的磁矩。当应用均匀偏置场时，张量坐标可以通过旋转全局坐标系来设置；对于非均匀偏置场，则不允许旋转全局坐标



来设置张量坐标。下面分别进行介绍。

### 1. 均匀偏置场

实际的直流偏置导致了铁氧体总是在张量坐标系中的  $Z$  方向的正方向饱和。假定初始张量坐标系与固有坐标系排列一致，张量的  $Z$  轴与模型的  $Z$  轴一致。要想模拟其他方向的偏置，需要将磁导率张量旋转到使其  $Z$  轴位于固有坐标系中的另一方向上。这可通过在为模型表面分配磁偏置源时定义关于轴的旋转角来实现。可以通过定义“Magnetic Bias Source”对话框来得到张量坐标系：首先，将张量坐标系绕固定  $X$  轴旋转  $\alpha$  度；其次，将旋转后的坐标系绕新的  $Y$  轴旋转  $\beta$  度；最后，将旋转后的坐标系绕新的  $Z$  轴旋转  $\gamma$  度。例如，要模拟一个在  $Y$  方向上的直流偏置，需要将张量坐标系旋转到  $Z$  轴与固有坐标系的  $Y$  轴一致，因此，可将对话框中的“X Angle”项设为  $-90$ ，“Y Angle”项设为  $0$ ，“Z Angle”项设为  $0$ 。

### 2. 非均匀偏置场

要想建立一个在静磁场偏置中的铁氧体模型，必须计算非均匀偏置场。然而要想得到非均匀偏置场的参数，需要在其他的静磁求解器（如 Ansoft 公司的另外一款软件 Maxwell 3D）中用静磁解模拟产生一个非均匀静磁场，然后将该结果导入 HFSS 中。

## 4.3 材料属性的设置

### 4.3.1 设置物体模型的材料属性

在 HFSS 的仿真设计中，物体模型创建完之后，需要设置物体模型的材料属性，以模拟实际工程应用中的材料特性情况，确保仿真计算的准确性和针对性。物体模型材料属性的设置步骤很简单：首先选中需要指定材料的物体模型，然后在属性窗口中单击“Material”项后面的 **vacuum** 按钮，或在右键菜单中选择 Assign Material... 命令，将弹出“Select Definition”对话框，如图 4-21 所示。

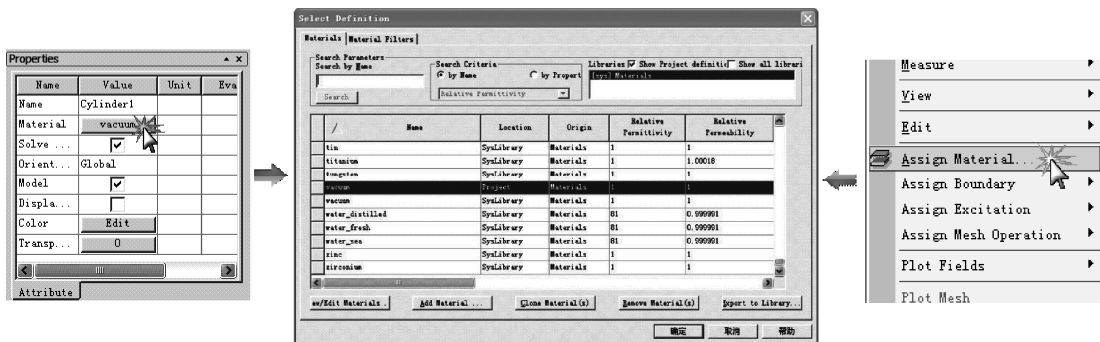


图 4-21 打开“Select Definition”对话框

“Select Definition”对话框中列出了 Material Library 中所有已定义的各种材料及相关材料参数，用户可以直接选择所需的材料，再单击“确定”按钮完成该模型材料的设置。如果材料列表中没有用户需要的材料，HFSS 可以通过修改编辑现有材料参数或创建新材料来进

行设置，单击“Select Definition”对话框左下角的“View/Edit Materials”按钮，进入“View/Edit Material（查看/编辑材料）”对话框，此时可以进行相关参数的修改，但是要注意的是如果保存修改，将永久性改变该材料在材料库中的参数；单击“Add Material”按钮，打开如图 4-22 所示的“View/Edit Material（查看/编辑材料）”对话框，可以添加用户需要的新材料。

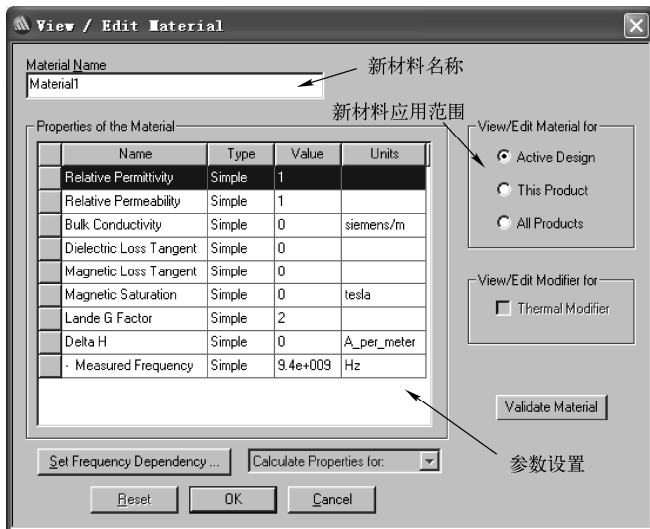


图 4-22 “View/Edit Material（查看/编辑材料）”对话框

### 4.3.2 材料属性说明

为了便于读者理解和进行设置，下面简单介绍一下材料属性中各种参数的含义。

(1) Relative Permittivity（相对介电常数）：此项后输入的参量为  $\epsilon_r$ ， $\epsilon_r = 1 + \chi_e$  称为介质的相对介电常数或相对电容率； $\chi_e$  是没有量纲的参数，称为电极化率，它可以衡量电介质极化的能力，不同的介质， $\chi_e$  值不同。材料的介电常数  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ， $\epsilon_0$  为真空中的介电常数。

(2) Relative Permeability（相对磁导率）：此项后输入的参量为  $u_r$ ， $u_r = 1 + \chi_m$  称为磁性材料的相对磁导率； $\chi_m$  是没有量纲的参数，称为磁化率，它可以衡量物质的磁化能力，不同的磁性材料， $\chi_m$  值不同。介质的磁导率  $u = u_0 u_r$ ， $u_0$  为真空中的磁导率。

(3) Bulk Conductivity（电导率）：与阻抗边界条件时设置电导率一样，在 HFSS 中也可以在模型中将电导率作为物体材料属性的一个损耗因子来使用。不同的是，边界条件可以在导体的厚度超过对应频率的集肤深度时应用，在这种情况下，导体内部的未知数不包含在未知数向量中，从而产生了更小的矩阵并得到了更快地求解。当导体相对于集肤深度不是很厚时，需要设置物体材料的电导率以进行准确求解，此时电磁场的波动方程为

$$\nabla \times \left( \frac{-1}{j\omega u} \nabla \times E \right) = (j\omega \epsilon + \sigma) E$$

(4) Dielectric Loss Tangent（介质损耗角正切）：该参数用来描述介质材料在高频电场中



功率的损耗。所有介质的相对介电常数都可以用一个复数来表示, 即  $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$ , 也可以写成  $\varepsilon = \varepsilon'(1 + j\varepsilon''/\varepsilon')$ , 其中  $\varepsilon'$  是  $\varepsilon$  的实部,  $\varepsilon''/\varepsilon'$  即为介质损耗角正切。介质损耗角正切越小, 材料的损耗就越小。同时, 介质损耗角正切还是频率的函数。

(5) Magnetic Loss Tangent (磁损耗角正切): 与介质损耗角正切相对应, 磁损耗角正切反映的是材料在高频磁场中功率的损耗, 该数值越小, 表示材料的损耗就越小。

对于各向异性材料来说, 材料的特性随方向的不同而变化, 因此这种材料的属性是用各向异性张量来定义的。它的介电常数、电导率、磁导率、介质损耗角正切及磁损耗角正切等张量是用一个对角矩阵的形式定义的, 每个对角元素代表了材料沿一个轴向的张量。例如, 各向异性材料的相对介电常数张量表示为

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \varepsilon_0 \end{bmatrix}$$

式中,  $\varepsilon_1$  是材料的介电常数张量沿第一个轴向上的相对介电常数;  $\varepsilon_2$  是材料的介电常数张量沿第二个轴向上的相对介电常数;  $\varepsilon_3$  是材料的介电常数张量沿第三个轴向上的相对介电常数;  $\varepsilon_0$  是真空中介电常数。各向异性材料的其他属性参数张量具有类似的形式, 这里就不再列出了, 下面重点介绍一下一种特殊的材料——铁氧体材料。

在电磁仿真设计中有一种特殊的材料就是铁氧体材料, 它是一种各向异性的介质材料, 广泛应用在各种微波器件中。它的特点是磁导率张量的旋转特性非常明显: 当经过铁氧体的微波信号的极化方向与磁偶极矩的运动方向相同时, 信号与材料之间有强烈的互作用; 当经过铁氧体的微波信号的极化方向与磁偶极矩的运动方向相反时, 互作用较弱。由于信号和材料的互作用依赖于旋转方向, 所以对于不同的极化方向, 信号有着不同的特性。铁氧体材料的参数有以下几个。

(1) Magnetic Saturation (饱和磁矩): 当铁氧体放置在均匀磁场中时, 磁偶极矩将沿磁场方向排列, 随着磁场强度的增加, 更多的磁偶极矩沿磁场方向排列。饱和磁矩  $M_s$  描述了所有磁偶极矩定向排列的点, 在该点再增加偏置磁场强度将不再引起磁矩的变化。

(2) Landed G 因子: 该参数描述了铁氧体材料中由电子的轨道矩和旋转矩得到的总的磁矩。当总磁矩只取决于轨道矩时, Landed G 值为 1; 当总磁矩只取决于旋转矩时, Landed G 值为 2。对于铁氧体材料, Landed G 值是一个无量纲的量, 大部分在 1.99~2.01 之间。

(3) Delta H (磁共振线宽): 磁共振线宽是铁氧体共振测量中最大共振一半处的共振线宽, 其与外加磁场去掉后铁氧体具有多快的阻尼运动有关。其单位为奥斯特。

## 4.4 网格剖分的设置

### 4.4.1 自适应网格剖分

#### 1. HFSS 的自适应网格剖分技术

HFSS 采用有限元来分析三维物体的电磁特性, 有限元法求解问题的基本过程包括分析



对象的离散化、有限元求解和计算结果的后处理 3 大部分。HFSS 采用了自适应网格剖分技术,这是该软件的特色之一。HFSS 采用了非线性网格,网格单元为四面体。理论和事实都证明四面体网格特别适合于模拟任意形状的几何体,尤其是在模拟不规则几何形体时,比矩形、六面体等单元更加灵活;并且在未知量数目相同的情况下,采用四面体比采用矩形和六面体的有限元数值解精度要高。进一步说,HFSS 的四面体棱边元是求解任意三维结构电磁场的最优选。在进行求解时,网格剖分由 HFSS 自动完成,包括自动生成初始网格,根据电场分布进行自适应网格加密,并自动判断收敛,无须人为干预。

自适应网格剖分的具体过程为:初始网格根据模型的顶点生成,并基于波长进行网格加密;在自适应迭代过程中,HFSS 根据求解空间中的电场梯度进行非均匀网格加密,电场梯度大的区域增加多的网格,反之增加少的网格。完成一次网格细化过程后,HFSS 重新计算并判断是否满足设置的收敛条件,如果满足收敛条件,则网格剖分完成;如果不满足收敛条件,则继续下一次网格细化过程(求解-误差分析-自适应细化网格),直至求解结果收敛或达到设置的最大迭代次数为止(迭代次数和收敛标准的设置将在 4.5 节中介绍)。自适应网格剖分求解效果如图 4-23 所示。

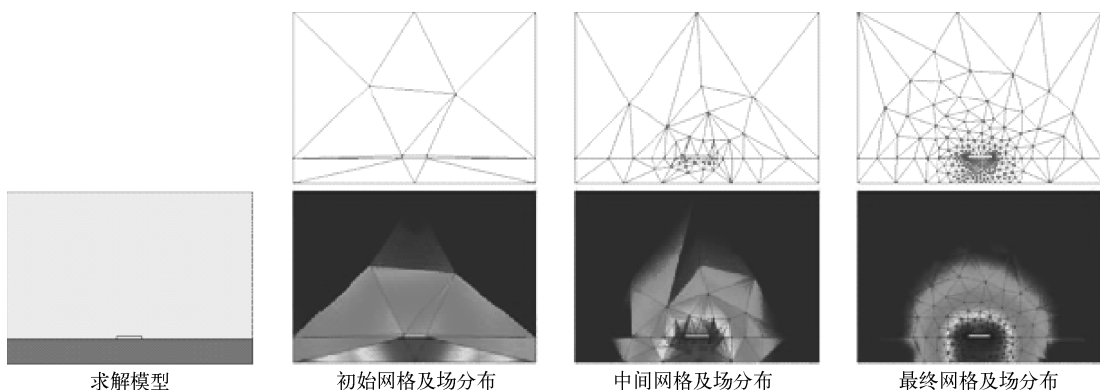


图 4-23 自适应网格剖分求解效果

对于每次迭代细化剖分时,网格增加的比例,HFSS 的默认数值为 30%,用户也可以自己设置网格增加的百分比,设置的方法是在“Solution Setup (求解设置)”对话框的“Options”选项卡的“Adaptive Options”栏中的“Maximum Refinement Per Pass”项中输入所需的比例数值,如图 4-24 所示。

大多数情况下可以使用默认值 30%;对于强烈谐振的结构,可将值设置为 50%或更多,以减少迭代的次数。但是不要设置 10%以下的比例,以免造成迭代次数的过度增加和伪收敛情况的发生。

自适应网格剖分技术超越了设计经验的局限性,与其他需要使用者指定或借助于经验的专家系统的电磁场仿真软件有着本质的区别。此外,HFSS 在网格剖分的容错技术上投入了大量的研发,确保在求解时生成更高质量的有限元网格;不论是电大尺寸结构还是复杂三维结构,它都可快速、合理地生成网格;使用者不但可以方便地对物体模型进行网格剖分,还可以通过数表的方式查看各部件的网格数量、尺寸、体积等参数。

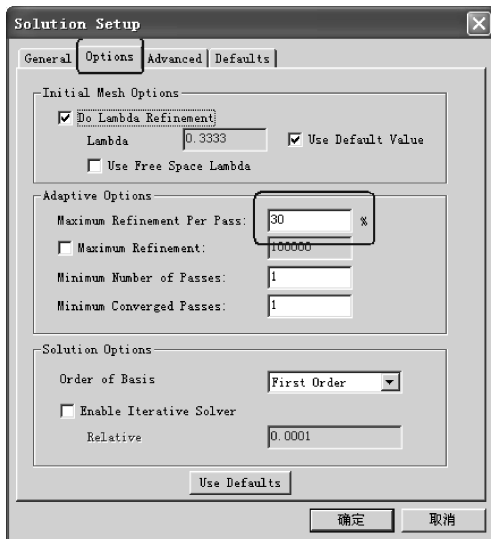


图 4-24 在“Solution Setup (求解设置)”对话框中指定网格增加的比例



### 特别说明

如果设定的是扫频计算，则 HFSS 在解决其他频点求解问题时不再进一步细化网格，自适应求解仅在指定求解频率上进行。另外，HFSS 并不是在每次求解过程开始时都生成初始网格，仅在当前网格不可用时才生成初始网格。

## 2. 收敛精度及标准

自适应网格剖分时，每一次网格细化的迭代过程在 HFSS 中称为一个“Pass”。用户除了可以指定收敛精度外，还可以设置自适应的迭代次数，如图 4-25 所示。



图 4-25 “Solution Setup (求解设置)”对话框中迭代次数和收敛精度的设置



不同的求解类型和端口激励方式对应不同的收敛标准，判断参数主要有  $\Delta S$ 、 $\Delta E$  和  $\Delta F$ ，它们的对应含义分别如下所示。

### 1) $\Delta S$ 收敛

在波端口激励和集总端口激励问题中一般使用  $\Delta S$  作为收敛标准。

$\Delta S$  指的是在自适应网格剖分过程中，每次网格细化前后  $S$  参数幅度的变化。 $\Delta S$  的最大值定义为  $\text{Max}[\text{mag}(S^{N+1} - S^N)]$ ，其中  $S^N$  表示第  $N$  次迭代时计算得到的  $S$  参数。当网格密度没有达到求解精度要求时，网格的每次细化将造成  $S$  参数求解结果的较大变化，造成  $\Delta S$  较大，无法满足收敛标准，因此，HFSS 将继续细化网格。当网格密度达到一定程度时，网格的剖分充分体现了场在空间的变化，此时网格增加， $S$  参数求解结果的变化很小，满足收敛标准。网格剖分密度不够时的  $\Delta S$  如图 4-26 所示。网格剖分密度足够时的  $\Delta S$  如图 4-27 所示。

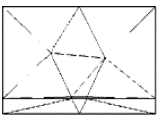
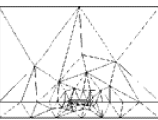
迭代次数	网格剖分	$S$ 参数	两者关系	$\Delta S$
Pass $N$		$S^N$	$S^N \neq S^{N+1}$	较大
Pass $N+1$		$S^{N+1}$		

图 4-26 网格剖分密度不够时的  $\Delta S$

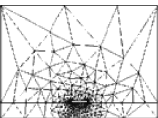
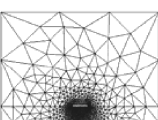
迭代次数	网格剖分	$S$ 参数	两者关系	$\Delta S$
Pass $N$		$S^N$	$S^N \approx S^{N+1}$	非常小
Pass $N+1$		$S^{N+1}$		

图 4-27 网格剖分密度足够时的  $\Delta S$

### 2) $\Delta E$ 收敛

电压源激励、电流源激励、入射波激励和磁偏置激励问题使用  $\Delta E$  的最大值作为收敛标准。

$\Delta E$  指的是在自适应网格剖分过程中，每次网格细化前后计算出的能量误差，是衡量每步迭代之间电场是否稳定的判断标准。随着网格的细化和解的收敛，当迭代前后的  $\Delta E$  的最大值小于用户设定的值时，自适应网格剖分细化完成，否则网格剖分细化将一直进行下去，直到满足收敛标准或达到最大迭代次数为止。



### 3) $\Delta F$ 收敛

$\Delta F$  收敛是用于本征模求解类型中的收敛标准。

$\Delta F$  是指网格细化前后, 计算出的谐振频率的差值相对于求解频率的百分比。对于无耗材质,  $\Delta F$  的最大值是网格细化前后所有模式中频率实部变化的最大百分比; 对于有耗材质,  $\Delta F$  的最大值是从所有模式中频率实部变化的最大百分比和频率虚部变化的最大百分比两者之间选取的较大者。当网格细化前后的  $\Delta F$  的最大值小于用户设定的收敛标准时, 自适应网格剖分细化完成, 否则分析将一直进行下去, 直到满足收敛标准或达到最大迭代次数为止。

关于收敛误差值的设置, 从理论上讲, 收敛误差越小, 计算结果越精确。但收敛误差设置得越小, 意味着迭代次数越多, 有时过小的误差值会使得 HFSS 的计算量成倍地增加; 而在实际制造和实验室测量中都会有一定的误差存在。因此, HFSS 只需要能够保证一定水平的准确性, 这个准确性大于在真实世界中引入的固有误差就可以了。一般情况下, 收敛误差使用 HFSS 系统的默认值, 其中  $\Delta S$  的默认值为 0.02,  $\Delta E$  的默认值为 0.1,  $\Delta F$  的默认值为 10%。如果要设置得更精确, 取默认值的一半就足够了。

## 4.4.2 手动设置网格

用户如果想要手动设置网格, 可以选择“HFSS→Mesh Operations”子菜单中的相应命令进行操作。在网格细化过程中, 可使用 HFSS 对模型的表面或内部的四面体单元的长度进行细化, 直到其小于某一特定值(基于长度的网格细化)为止, 也可使用 HFSS 对所有的表面或内部的四面体单元的表面三角形长度进行细化, 直到其小于某一特定值(基于集肤深度的网格细化)为止。下面分别介绍这两种设置方式。

### 1. 基于长度的网格细化

当要求基于长度的精细剖分时, 可用 HFSS 对四面体单元的长度进行细化, 直到长度小于设定值为止。四面体的长度定义为其最长边的长度。

既可在目标表面或内部指明四面体的最大长度, 也可在细化网格的过程中设定单元的最大数目。当初始剖分生成后, 精细网格的标准将被用于细化初始网格。

### 2. 基于集肤深度的网格细化

当要求集肤深度的精细剖分时, 可用 HFSS 将所有四面体单元表面的三角形边长细化到某一特定值。以表面剖分为基础可产生分层的网格, 每层按集肤深度和指定的层数依序排列。

在基于集肤深度的精细剖分过程中, HFSS 会创建一组每层都平行于目标表面的平面, 并且这组平面在指定的集肤深度内按几何级数分布。对于表面上的每一个点, 在网格中加一组点  $(P_0, P_1, P_2, \dots, P_n)$ , 其中  $n$  为层数,  $P_0$  为表面上的每一个点,  $P_0$  到  $P_n$  的距离为集肤深度。这些点以一种非均匀方式间隔开, 从  $P_n$  到  $P_0$  的距离以几何级数递增。

基于集肤深度的网格细化首先满足了表面三角形边长的标准, 然后在其余各层上引入一系列点。如果对剖分的增长率设定一个限制, 则可设定以下几种情况:





(1) 限定值设置得足够高以满足集肤深度的网格细化;

(2) 限定值设置得足够高以达到三角形边长要求的标准,但在深度方向上并没有严格的限制;

(3) 限定值不必达到表面三角形边长要求的标准。

由于通过集肤深度细化网格可以加入许多点,所以首先基于长度的网格细化方法来细分物体表面网格,以此来获得集肤深度细化网格时所选取的 HFSS 点的精确数目,将有助于在手动设置集肤深度之前获得表面边长标准、剖分单元的大概数目和表面上点的数目。给定的网格细化标准也将用于电流网格。

### 3. 手动设置网格准则

在下列情况下,往往需要进行手动网格设置:

(1) 模型内部的强电场和强磁场(带有强容性载或强感性负载)区域中,如谐振结构中的容性加载缝隙、波导的尖角或拐角、滤波器结构中多耦合线之间的缝隙;

(2) 与边界相比具有高精度的表面,如长的 PCB 导线路径或表面的长线,调节剖分点使其大致等于导线路径的宽度或长线的直径,使其在第一次的自适应迭代中即可反映这些高精度结构。

这些剖分操作会作用于细化已生成的初始网格。也可选择仅应用于剖分操作而不产生解,在这种情况下,剖分操作仅用于生成当前网格。

### 4.4.3 表面近似设置

在少数情况下,也可定义一个剖分操作来修正模型的一个面或多个面的表面近似设置。表面近似设置仅适用于网格初始化。

HFSS 中的目标面可能是平面、柱面、锥面、环面、球面或螺旋面。称最初的模型表面为真实表面。为了产生一个有限元网格, HFSS 首先将所有的真实表面剖分为三角形。由于是采用一系列的直线段来表示曲面或平面的,所以称这些三角形表面为多面体表面。以平面为例,这些三角形恰好都在模型表面,真实表面和剖分表面的位置或法向没有区别。当模型表面为非平面时,多面体表面与物体的真实表面就有一小段距离,称这一距离为表面偏差,用模型的长度单位来计量。靠近三角形中心处的表面偏差比靠近三角形顶点处的表面偏差要大。

曲面的法向随着曲面的位置而变化,但在一个三角形内法线保持一致(在这里,法线定义为与表面垂直的直线)。曲面的法向与剖分网格的表面之间的角度偏差称为法向偏差,以度为单位计量。

平面中的三角形的纵横比为三角形的外接圆半径与三角形的内切圆半径之比。一个等边三角形的纵横比为 1,而越狭长的三角形,其纵横比趋于无限大。

执行“HFSS→Mesh Operations→Assign→Surface Approximation...”命令,如图 4-28 所示,可以在一个或多个表面上修改表面偏差、允许的最大偏差和三角形的最大纵横比。表面近似设置将用于初始剖分。



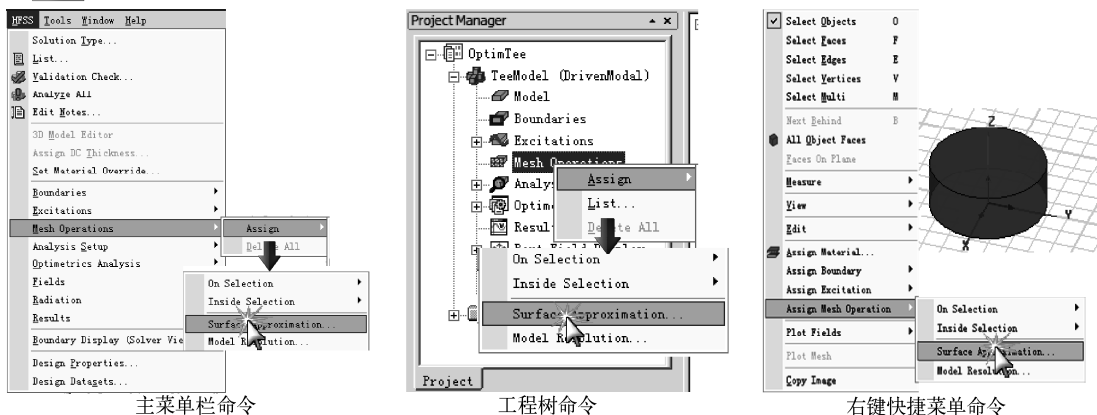


图 4-28 表面近似设置命令



对于初始网格，三角形所有的顶点都位于真实表面上；在自适应剖分过程中，顶点增加到剖分表面，而不是真实表面。

若要对一个或多个目标面的表面近似设置进行修改，可不使用预设的表面近似设置而使曲面描述得更准确。曲面描述越准确，网格量和 CPU 的时间及内存需求就越多。在大多数情况下，默认设置就足够了。如果想更快地求解，则需要对整个物体应用粗糙的表面近似设置。

HFSS 很难做到三角形的纵横比接近 1，这是因为只有等边三角形可以被填充到网格中。因此，纵横比设置为 1 会导致不可思议的巨大网格。HFSS 限制平面物体的纵横比为 4，曲面物体的纵横比为 1.2。

进入表面近似设置界面的方法：首先选中要修改的物体模型或具体表面，然后选择以下三种途径之一，打开“Surface Approximations（表面近似）”设置对话框，如图 4-29 所示。

(1) 选择主菜单栏中的“HFSS→Mesh Operations→Assign→Surface Approximation...”命令。

(2) 在工程管理树中的“Mesh Operations”节点下，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign→Surface Approximation...”命令。

(3) 在模型显示窗口单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Mesh Operation→Surface Approximations”命令。

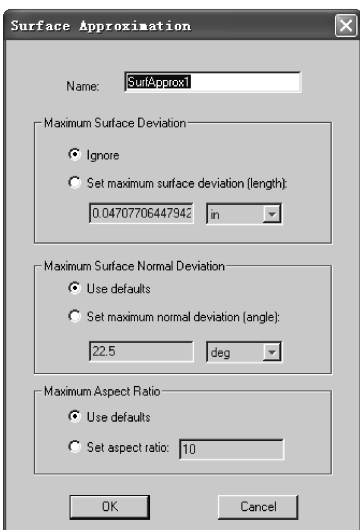


图 4-29 “Surface Approximations（表面近似）”设置对话框

“Surface Approximation（表面近似）”设置对话框中各选项的定义如下。



(1) **Maximum Surface Deviation** (最大表面偏移): 最大表面偏移是四面体表面与真实曲线几何体表面之间的最大间隔。间隔的长度单位是画图时使用的单位。

(2) **Maximum Surface Normal Deviation** (最大法线偏移): 最大法线偏移是四面体表面的法线与真实曲线几何体表面法线之间最大的角度差。其单位是度( $^{\circ}$ )。

(3) **Maximum Aspect Ratio** (最大纵横比): 最大纵横比是所选物体剖分的所有四面体全部表面中纵横比允许的最大值。这一设置影响网格的质量而不是实际的网格体积或表面定位。

对于每一个选项, 用户都可以进行强制定义或选择系统默认设置。

(1) **Ignore** (忽略): 表示不进行强约束, 包括 HFSS 的“内置”约束。此时, HFSS 将产生普通的初始网格。

(2) **Use Defaults** (使用默认): 表示保留 HFSS 的“内置”约束。当不想施加太紧的强约束, 但又不放弃“内置”约束时, 可以选择此设置。

(3) **Set...** (设置...): 进行强制定义。可在后面对应的输入框中输入具体的数值, 施加用户想要的约束条件。

#### 4.4.4 网格使用建议

(1) 不要过度设置。太严厉的设置(如  $1^{\circ}$  的法线偏移)将产生很差的网格质量。这是由于纵横比、环绕物体很差的网格梯度等原因。

(2) 使用纵横比设置时, 同时只能使用法线或表面偏移设置中的一个。对于圆柱形状的物体, 同时会碰到曲面和平面, 但法线或表面偏移设置只能用于曲线表面, 因此同时设置纵横比限制(如 4:1)将在平面表面上强制产生少量额外的三角形并且有助于防止清除整个网格。

(3) 如果想减少网格, 可考虑使用多面体和多边形。如果设计包含很多你只想粗糙划分网格的曲线物体(如接地过孔的全部围栏), 在这种条件下,  $22.5^{\circ}$  的默认法线偏移是没必要的, 并且几何物体也不是很重要, 可考虑把过孔画成六边形甚至四方形实体, 无须刻意去减少这些物体网格划分的保真度。

(4) 理论上, 网格划分得越小越精确, 但是计算时间将会大大增加而且达到一定的精度后再细化网格对计算结果影响不大。因此没有必要追求极小, 一般来说选择默认设置即可, 除非有特殊要求。

## 4.5 分析求解的设置

### 4.5.1 求解类型

创建新的仿真设计时, 首先要设置该设计采用的求解类型。选择主菜单栏中的“HFSS  $\rightarrow$  Solution Type...”命令, 会弹出“Solution Type (求解类型)”设置对话框, 如图 4-30 所示。

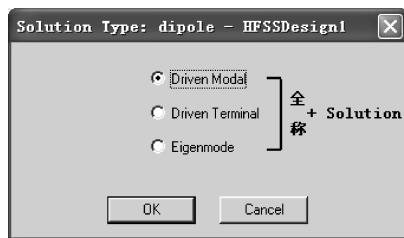


图 4-30 “Solution Type (求解类型)”设置对话框



从图 4-30 中可以看到, HFSS 的求解类型主要有模式驱动求解 (Driven Modal Solution)、终端驱动求解 (Driven Terminal Solution) 和本征模求解 (Eigenmode Solution) 三种方式, 前两种都可以归类到激励求解的范畴, 只是  $S$  参数的计算方法不同而已, 下面详细介绍每种求解方式的使用范围和注意事项。

### 1. 模式驱动求解 (Driven Modal Solution)

这种解算类型计算以模式为基础的  $S$  参数, 并采用波导模式的入射和反射功率表示  $S$  参数矩阵的解。

对于模式驱动可以简单地理解为: 软件根据用户定义的端口激励模式来解算对应端口的模式和电磁场分布, 计算时每种模式都具有相等的 1W 平均功率, 因此, 端口的大小设置对解的计算是很重要的 (功率是以  $E \times H$  在整个端口面积分来计算的, 太小的端口可能导致计算不准确)。默认端口阻抗按  $Z_{pi}$  来计算, 因此, 除非为了标定电场的极化方向, 并强制要求定义积分线,  $S$  参数均用一系列波导模的入射和反射功率来表示。

模式驱动求解主要用来分析微带、波导、传输线结构的单终端微波传输问题, 以及由这些结构激励的天线辐射问题。

### 2. 终端驱动求解 (Driven Terminal Solution)

这种解算类型计算以终端为基础的多导体传输线端口的  $S$  参数。此时, 采用传输线终端的电压和电流表示  $S$  参数矩阵的解。

终端驱动求解主要用来分析耦合传输线等一个端口上有多个终端 (多微带线耦合问题) 的模型。在终端驱动模式下, 默认的求解阻抗为  $Z_{vi}$ , 因此对于每个终端需要定义积分线,  $S$  参数的解将用一系列终端电压和电流来表示。

### 3. 本征模求解 (Eigenmode Solution)

这种解算类型计算某一结构的本征模式或谐振。本征模解算器可以求出该结构的谐振频率及这些谐振频率下的场模式。

本征模解算器可以求解以下工程问题:

- (1) 本征模 (或谐振) 的频率;
- (2) 谐振腔的无载品质因数  $Q$ ;
- (3) 自由空间的波数。

品质因数  $Q$  是系统损失了多少能量的量度, 而无载  $Q$  值反映了由材料的损耗造成的能量损失。由于本征模问题不包含端口和激励源, 所以计算得到的  $Q$  值不包含由这些源引起的损耗。

使用本征模求解模式还存在以下限制:

- (1) 不需要定义端口激励方式;
- (2) 不能定义辐射边界条件;
- (3) 不支持扫频求解模式;
- (4) 不可用来模拟铁氧体结构;
- (5) 不计算  $S$  参数, 只求解场分布和  $Q$  值。



### 4.5.2 不同求解类型的比较

Driven Modal Solution 模式是基于功率来计算  $S$  参数的, 对每个端口模式以 1W 的功率去激励, 其他端口馈以 0W 功率, 以此来计算。因此, 端口的大小设置对解的计算是很重要的, 这是因为此时功率是以  $E \times H$  在整个端口的面积分来计算的, 太小的端口可能导致计算不准确。默认时, 以  $Z_{pi}$  来计算特性阻抗。

对于 Driven Modal Solution 下的 Wave Port 端口, 可以不设积分线, 以  $Z_{pi}$  来计算  $S$  参量。Driven Modal Solution 模式将 Wave Port 端口匹配以相同截面导波结构来馈以 1W 功率, 因此, 其默认  $S$  参数并不是一般固定的  $50\Omega$  阻抗。可以在 Post Processing 设置归一化阻抗。因此, 仿真分析结果中的  $S$  参数与 Terminal Solution Data 中的并不太一样, 需要相同的归一化电阻, 2 个值才相同。读者可以给 Wave Port 设置积分线, 选择  $Z_{vi}$  或  $Z_{pv}$  方式来计算  $S$  参数。按照 HFSS Online Help 所述, 计算 TEM 模式, 应用  $Z_{vi}$  能够真实地反映出端口的阻抗, 因此, 计算同轴线这种 TEM 模式时, 可以用 Driven Terminal Solution 模式求解, 下面将会提到, Driven Terminal Solution 默认是用  $Z_{vi}$  来计算的; 也可以用 Driven Modal Solution, 但是需要设置积分线, 并且将 Wave Port 的阻抗求解方式改为  $Z_{vi}$ 。对于微带线这种准 TEM 模式来说, 有时用  $Z_{pi}$  计算更加精确。对于沟槽状结构 (如翼线, 共面波导), 用  $Z_{pv}$  计算是最为准确的。

对于 Driven Modal Solution 模式下的 Lumped Port 端口, 则必须设置积分线, 这个积分线明确了电压  $V$  的积分方向, 箭头代表高电势。一般需要将积分线两端接在两个不同的导体上, 对于 PEC 属性的导体, 积分线只需要连接两个导体即可, 对线是否垂直于面, 是否与电场线平行没有要求; 但对于非 PEC 导体, 积分线的歪斜对结果有一定的影响 (特别是在参数扫描中可以看到, 积分线随着参数而变化时,  $Z$  会发生一定的变化)。Driven Modal Solution 下的 Lumped Port 端口的默认求解类型也是  $Z_{pi}$ , 可以根据需要改成  $Z_{pv}$  和  $Z_{vi}$ 。对于 Lumped Port, 默认匹配以  $50\Omega$  集总电阻。可以重新设置匹配电阻, 以及归一化阻抗 (与 Wave Port 不同, 默认是  $50\Omega$  阻抗归一化)。 $Z_{pi}$  计算方式是不需要积分线的, 对于  $P$  和  $I$  的计算, 只需要对  $E \times H$  和  $H$  在整个端口上积分即可。在这里, Lumped Port 设置积分线的目的是为了明确输入功率的位置 (一般端口是含有 2 个导体的)。Lumped Port 与 Wave Port 的另一个区别是 Lumped Port 端口只能设置一个模式, 一条积分线, 不像 Wave Port 那样可以设置多种模式; 并且 Lumped Port 一般用于内部端口, Wave Port 一般用于外部端口。

Driven Terminal Solution 模式是基于节点电压、电流值来计算  $S$  参数的, 对于每个端口以 1V 的电压去激励, 其他端口馈以零电压来计算。Driven Terminal Solution 模式只以  $Z_{vi}$  来计算特性阻抗, 对应的激励端口必须设置终端线, 且箭头指向馈电端来计算端口的电压。

Driven Terminal Solution 下的 Wave Port 也匹配以半无限长相同截面结构, 但是处理  $S$  参数等时, 默认是以  $50\Omega$  电阻来归一化的, 这一点与 Driven Modal Solution 不同。并且在这种情况下可以处理差分线结构, 这是在其他情况下不能做到的。Driven Terminal Solution 下的 Lumped Port 与 Modal Solution 都是通过计算电压、电流值来计算不同端口之间的耦合关系的, 只不过是使用  $Z_{vi}$  来计算特性阻抗的。




### 4.5.3 求解器的设置

创建完仿真模型并设置好了边界条件和激励方式后，接下来就需要对求解器进行设置了，目的是指定仿真模型的分析频率、扫描范围、自适应网格剖分次数，以及收敛精度等参数。

#### 1. 添加一个新的求解设置

为设计添加一个新的求解设置，可以通过以下步骤来完成。

(1) 用户可以通过三种途径进入求解设置界面（如图 4-31 所示）：一是选择主菜单栏中的“HFSS→Analysis Setup→Add Solution Setup...”命令；二是使用鼠标选中工程管理窗口中的“Analysis”项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup...”命令；三是在工具栏中单击求解设置快捷方式按钮。

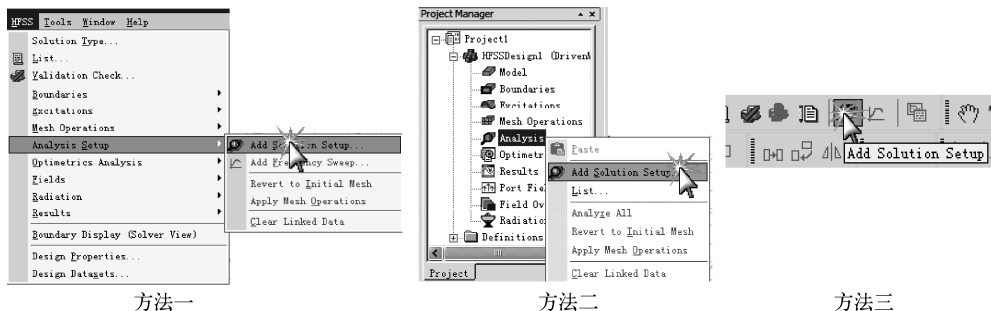


图 4-31 进入求解设置界面的三种方法

(2) 在弹出的如图 4-32 所示的“Solution Setup（求解设置）”对话框中依次设置相关参数。

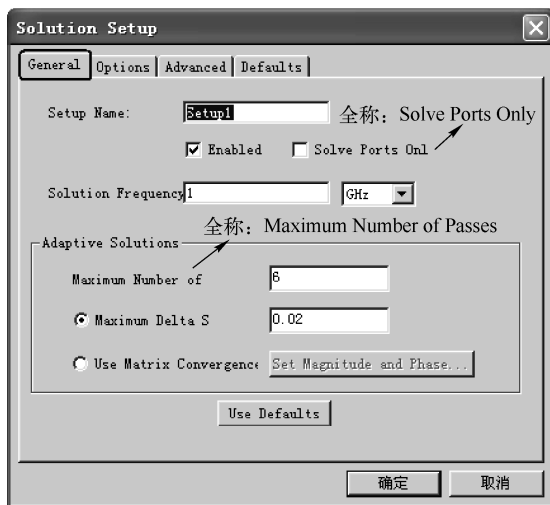


图 4-32 “Solution Setup（求解设置）”对话框

“Solution Setup（求解设置）”对话框中常用项目的功能含义如下。

#### 1) “General” 选项卡

(1) **Setup Name**: 求解设置的名称, 默认名称为 **Setupn**, 用户也可以自己键入其他名称; 求解设置完成后, 该名称会添加到工程树的“Analysis”节点下。

(2) **Enabled** 复选框: 该项表示是否激活当前求解设置项。选中该复选框表示 HFSS 仿真计算时需要分析该求解设置项, 反之则表示 HFSS 仿真计算时不需要分析该求解设置项。

(3) **Solve Ports Only** 复选框: 选中该复选框表示只计算端口平面的场模式, 通常用于在运行仿真计算之前确定模式数、模式的场和端口的长度, 从而给出正确的端口位置。

(4) **Solution Frequency**: 求解频率或自适应网格剖分的频率。

(5) **Maximum Number of Passes**: 最大迭代次数, 自适应网格剖分细化的过程在满足收敛误差或达到最大迭代次数时会自动停止。

(6) **Maximum Delta S**:  $S$  参数收敛误差标准  $\Delta S$ 。 $\Delta S$  是在 HFSS 迭代求解的过程中, 后一次求解得到的  $S$  参数与前一次得到的  $S$  参数矢量相减, 得到的差矢量的幅度最大的一个。它同时包含了幅度和相位的变化, 可以表示为  $\text{MaxDeltaS} = \max(\text{mag}[S_{ij}^{N+1} - S_{ij}^N])$ 。例如, 两

端口迭代求解的两次结果分别为  $S^N = \begin{bmatrix} S_{11}^N & S_{12}^N \\ S_{21}^N & S_{22}^N \end{bmatrix}$  和  $S^{N+1} = \begin{bmatrix} S_{11}^{N+1} & S_{12}^{N+1} \\ S_{21}^{N+1} & S_{22}^{N+1} \end{bmatrix}$ , 则  $\Delta S$  可由公式

$\text{MaxDeltaS} = \max\left(\text{mag}\begin{bmatrix} S_{11}^{N+1} - S_{11}^N & S_{12}^{N+1} - S_{12}^N \\ S_{21}^{N+1} - S_{21}^N & S_{22}^{N+1} - S_{22}^N \end{bmatrix}\right)$  得到。

(7) **Use Matrix Convergence**: 选中该项后, 会激活右侧的“Set Magnitude and Phase...”按钮, 同时“Maximum Delta S”项变为灰色, 不再生效; 单击“Set Magnitude and Phase...”按钮, 可以分别设置  $S$  参数的相位和幅度收敛误差标准, 只有两者同时收敛, 网格剖分才完成。

## 2) “Options”选项卡

“Solution Setup (求解设置)”对话框的“Options”选项卡如图 4-33 所示。

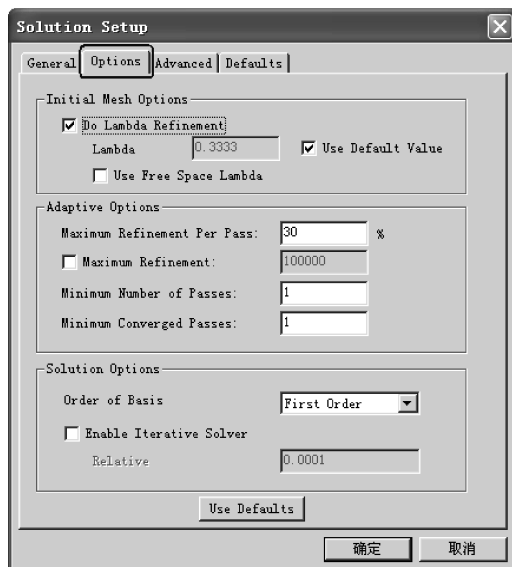


图 4-33 “Solution Setup (求解设置)”对话框的“Options”选项卡

(1) **Do Lambda Refinement:** 设置初始网格单元的大小, HFSS 会自动细分网格以使网格单元的长度满足此处的设置要求。例如, 默认的 Lambda 值为 0.3333, 以及要求初始网格单元的长度必须小于 1/3 个波长, 这个波长是基于前面设置的自适应网格剖分频率计算的。

(2) **Use Free Space Lambda:** 选中该项表示在初始网格剖分过程中, 忽略物体的材料特性, 以自由空间的波长作为衡量标准。对于高电导率的介质材料 (如脑组织液或盐水), 一般选中该项, 这样尽管射频信号只能穿透材料表面附近的有限区域, 但 HFSS 仍然能够产生足够多的初始网络。

(3) **Maximum Refinement Per Pass:** 自适应网格剖分时, 每次迭代前后, 网格数最多能增加的百分比。这将保证两次迭代之间的网格数有足够的变化, 确保不会收到虚假的收敛信息。默认值 30% 能满足绝大多数设计的要求。

(4) **Maximum Refinement:** 自适应网格剖分时, 每次迭代前后, 最多能增加的网格数。一般不选中该项, 而以 “Maximum Refinement Per Pass” 项设定的百分比作为标准。

(5) **Minimum Number of Passes:** 自适应网格剖分时, 无论是否达到收敛标准, 必须在完成此处所设定的最小迭代次数之后才能停止自适应网格剖分。

(6) **Minimum Converged Passes:** 自适应网格剖分时, 在达到收敛标准后, 还需要继续进行的迭代次数。

(7) **Order of Basis:** 选择有限元算法的基函数, 在其下拉列表中选择零阶基函数 (Zero Order)、一阶基函数 (First Order) 和二阶基函数 (Second Order)。基函数的选择会影响到 “Do Lambda Refinement” 处默认网格大小的设置。

在剖分单元数目相同的情况下, 高阶基函数具有更多的未知量, 计算结果更加准确。一般来说, 对于结果较为简单的电大尺寸问题, 选用高阶基函数可以在较少剖分单元的情况下获得较好的精度; 对于几何结构较为复杂的问题, 可以在较为细致的剖分情况下选用低阶基函数来逼近真实解。HFSS 默认选用的是一阶基函数 (First Order)。不同求解阶数对应的网格和未知量如图 4-34 所示。



图 4-34 不同求解阶数对应的网格和未知量

HFSS 电磁场有限元求解采用了四面体网格剖分, 在每个网格上求解 Maxwell 方程组, 其求解时间与网格数量、由网格生成的矩阵大小、矩阵的稀疏程度相关, 要根据仿真模型的具体情况进行选择。在求解过程中, 可以通过 “Solution Data (求解数据)” 对话框中的 “Profile” 选项卡观察网格数量、矩阵大小、求解时间、内存消耗等, 对它们进行比较, 并总结经验。





对于“Order of Basis”项中求解阶数的选择问题，一般来说，默认设置适合于大多数情况，如果需要调整，可以参考图 4-35 所示的一般性原则进行选取。

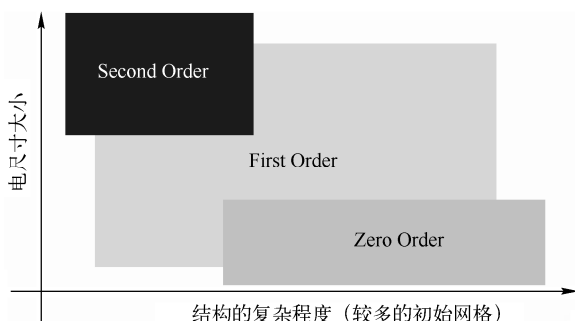


图 4-35 求解阶数选取的一般性原则

(8) Enable Iterative Solver: 选中该项后，HFSS 会使用迭代求解器对良态矩阵进行求解，对于大型问题，这样能极大地降低内存占用和减少计算时间；Relative 用来设置迭代求解器的收敛误差标准，一般取默认值 0.0001。该项不适合用来解决 Zero Order 问题。不选中该项，HFSS 会使用 Direct Solver（直接求解法）进行求解，两种求解方法的区别如下。

① Direct Solver:

- a. 通过逆矩阵求解矩阵，与迭代法相比消耗更多的内存；
- b. 求解稳定，不存在收敛性问题，对端口数量不敏感；

② Iterative Solver（迭代法求解）:

- a. 大规模矩阵求解效率高，内存消耗少；
- b. 求解不收敛时，自动切换回直接法进行求解；

③ 内存消耗比较。

- a. Direct Solver: 未知量  $N$  的 1.2~1.3 次方。
- b. Iterative Solver: 未知量  $N$  的 1.0~1.1 次方，接近线性。

Iterative Solver 的选择原则:

(1) 对于物理内存较小的计算机，求解端口数量较少的问题时，迭代法的速度提高明显；当端口数少于 CPU 数量的两倍时应选择迭代法，当端口数大于 CPU 数量的两倍时应采用直接法。

(2) 未知量在 10 万以下时采用 Direct Solver 的效率高；未知量在 30 万以上时采用 Iterative Solver 的效率高。



当选择了 Iterative Solver（迭代求解法）时，如果计算不收敛，则自动切换到 Direct Solver（直接求解法）进行求解；对于 Iterative Solver 中迭代收敛标准的设置，默认设置时可以得到与直接求解法同样的精度，如果需要修改则不要设置为大于 0.1。



## 3) “Advanced” 选项卡

“Solution Setup (求解设置)” 对话框的 “Advanced” 选项卡如图 4-36 所示。

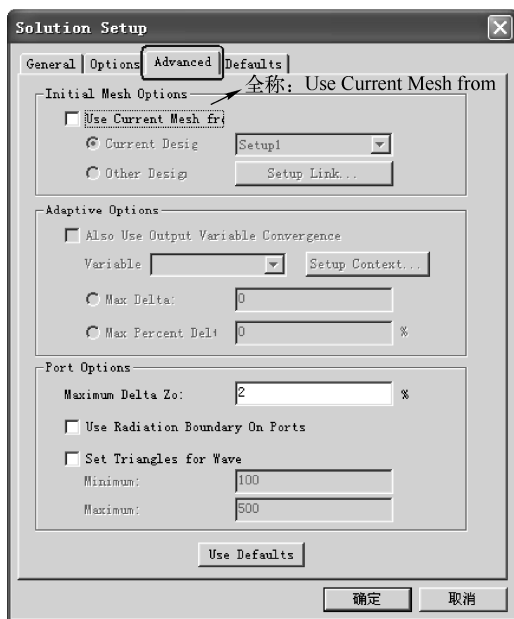


图 4-36 “Solution Setup (求解设置)” 对话框的 “Advanced” 选项卡

(1) Use Current Mesh from 复选框：使用其他设计所生成的网格。选中该复选框后，“Options” 选项卡中的 “Initial Mesh Options” 的相关设置不再生效。

(2) Maximum Delta  $Z_0$ ：设置端口平面自适应网格剖分时的收敛误差标准，用网格细化前后端口阻抗  $Z_0$  的变化百分比来表示。因为 HFSS 进行全三维解算时是将端口处的场设置为边界条件的，所以端口平面网格细分将导致 HFSS 细分整个模型的网格。因此，此处的收敛误差设定的值如果很小，会生成非常复杂且毫无必要的有限元网格。它一般取系统默认值 2% 即可。

(3) Use Radiation Boundary On Ports：该项只对波端口有效，选中该复选框后波端口与辐射边界的连接处会自动设为辐射边界条件；不选中该复选框，则自动设为理想导体边界条件。

(4) Set Triangles for Wave：端口处的网格剖分细化终止标准。每个模型端口处都将自适应地细分，直到满足 “Maximum Delta  $Z_0$ ” 处设置的收敛误差标准或达到所设置的网格剖分三角形个数的上限为止。选中该复选框后，在 “Minimum” 和 “Maximum” 项输入网格剖分时生成的三角形个数的下限和上限；如果不选中该复选框，HFSS 将根据端口的设置来确定合理的三角形个数的下限和上限。

完成上述各选项的设置，单击 “确定” 按钮完成求解设置。此时在工程管理窗口的 “Analysis” 节点下会自动添加完成的求解设置。重复以上步骤可以继续添加多个求解设置，所有的求解设置都会被添加到 “Analysis” 节点下，其默认名称编号为 Setup1, Setup2,

Setup3, …, 如图 4-37 所示。

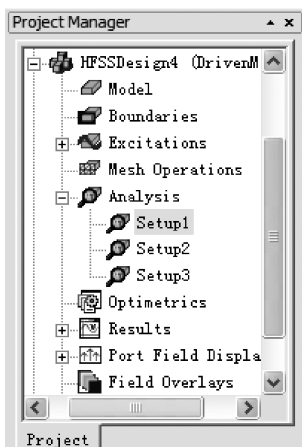


图 4-37 添加多个求解设置的工程管理窗口

## 2. 查看和修改已有的求解设置

求解设置完成后，用户可以通过双击工程管理窗口中的“Analysis”节点下对应的求解设置名称，进入设置窗口进行查看和修改。也可以在对应的右键菜单中对已有的求解设置进行操作，如图 4-38 所示。

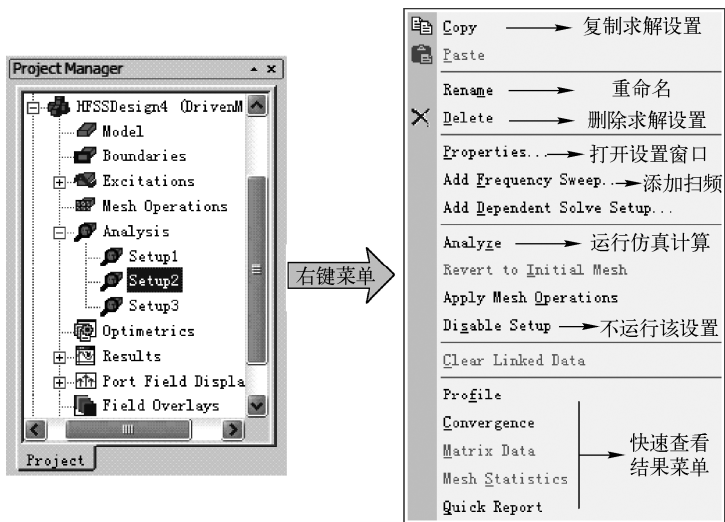


图 4-38 求解设置对应的右键菜单

对于不同的求解类型，求解设置中的部分参数会有所不同，但基本的设置步骤都是一样的。

## 3. 求解频率的选择技巧

HFSS 的自适应网格剖分是在用户设定的单一频点（求解频率）上进行的，网格剖分完成

后，同一求解设置下其他频点的求解都将在这一网格划分的基础上进行。因此，自适应网格剖分频率的选择对仿真结果有着重要的影响。通常，自适应网格剖分频率设置得越高，网格剖分得越细，网格数量也就越多，计算结果也相应地更加准确，但同时计算过程中所占用的计算机内存也就越多，计算所需时间也越长。合适的自适应网格剖分频率的选择应在保证求解结果尽可能准确的前提下，占用尽可能少的计算机内存和花费尽可能短的计算时间。以下是常用情况下，自适应网格剖分频率设置的一些技巧，供用户在以后设置求解频率时进行参考。

- (1) 点频或窄带问题：求解频率直接选择工作频率即可。
- (2) 宽频带问题：尽量选择最高频率作为自适应网格剖分频率。
- (3) 滤波器问题：选择滤波器通带内的高频率。
- (4) 快速扫频问题：选择中心频率。
- (5) 高速信号完整性问题：选择“时域计算器”计算需要的最高频率。

#### 4.5.4 扫频求解

4.5.3 节中在完成求解设置的同时，也完成了一个典型的对单频率的求解问题的设置。这样，HFSS 便可以对仿真模型进行自适应网格剖分，并对单频率点进行解算，以得到单一频率点上的  $S$  参数和电磁场分布，对应频率点就是在“Solution Frequency”项输入的频率，这也是执行扫频计算的第一步。

在许多仿真设计中，我们关注的并不是模型在单一频率点上的电磁特性，而是需要分析计算在一定的频率范围内模型的  $S$  参数、场分布等电磁特性，这就需要进行扫频设置。

##### 1. 添加扫频设置

如图 4-39 所示，用户可以通过以下三种方式打开“Edit Sweep（扫频设置）”对话框：

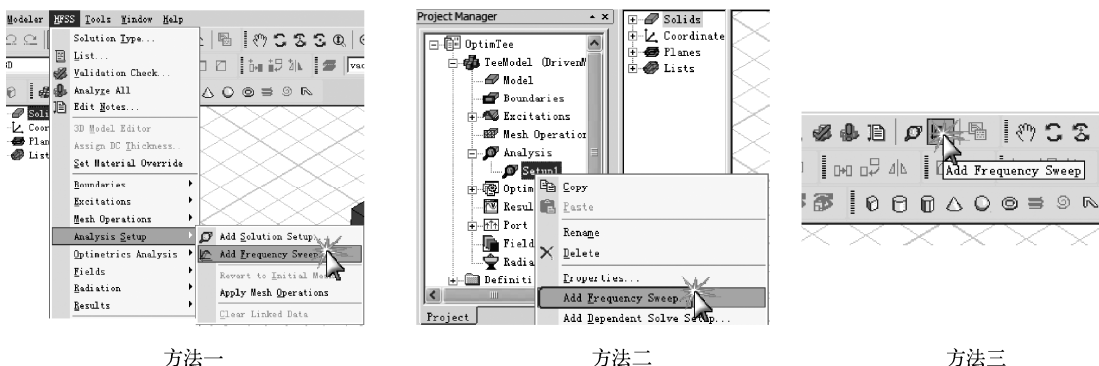


图 4-39 打开“Edit Sweep（扫频设置）”对话框的方法

- (1) 在主菜单栏中选择“HFSS→Analysis Setup→Add Frequency Sweep...”命令；
- (2) 在工程管理窗口中选中需要添加扫频设置的求解设置名称，然后单击鼠标右键，在对应的右键菜单中选择“Add Frequency Sweep...”命令；
- (3) 单击工具栏中的快捷按钮, 命令执行后会弹出“Edit Sweep（扫频设置）”对话框，如图 4-40 所示。

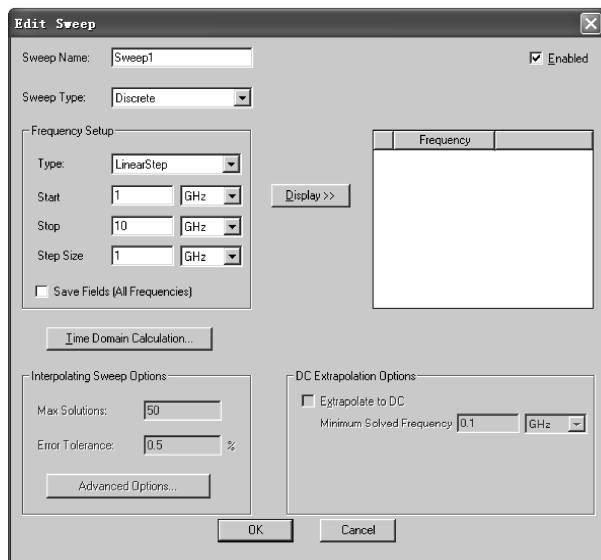


图 4-40 “Edit Sweep (扫频设置)”对话框

“Edit Sweep (扫频设置)”对话框中各选项的具体含义如下。

- (1) Sweep Name: 扫频设置名称, HFSS 只支持英文名称, 默认设置下为 Sweep $n$ 。
- (2) Sweep Type: 扫频模式, 有三种模式可以选择: 离散扫频 (Discrete)、快速扫频 (Fast) 和插值扫频 (Interpolating)。

(3) Frequency Setup: 扫频采用的频率设置方式, 主要有线性步进方式 (Linear Step): 指定一个常量为线形变化步进值; 线性点数方式 (Linear Count): 指定扫频范围线性变化的点数; 单一频点 (Single Points): 指定若干单一频点进行扫描。设置好后单击中间的 **Display >>** 按钮, 右侧的窗口中便会显示出参与计算的所有频点。

(4) Save Fields (All Frequencies) 复选框: 选中该框后, 所有参与计算频点处的场解将会被保存, 否则在离散扫频模式下, 只会保存终止频率点的场解; 对于快速扫频, 则只会保存中心频点处的场解; 对于插值扫频, 不会出现该对话框, HFSS 只保存最后计算的频点处的场解。

(5) Time Domain Calculation: 单击该按钮可以打开 “Time Domain Calculation (时域计算器)” 对话框, 如图 4-41 所示。

在进行高速数字信号分析或全波 SPICE 分析时, 通过设置该对话框中的参数, 可以帮助确定一个合适的频率扫描解决方案。操作步骤如下。

① 在 “Edit Sweep (扫频设置)” 对话框中单击 “Time Domain Calculation (时域计算器)” 按钮, 弹出 “时域计算” 对话框。

② 在 “Signal Rise Time (数字信号上升沿时间)” 一栏中输入一个最小上升时间值  $\tau$ 。此值表示输入时间信号的变化率并应用在电路模拟器中。

③ 在 “Time Steps Per Rise Time (采样步数)” 一栏中输入一个值, 作为采样步数  $N_r$ , 则整个信号的实时采样时间增量由以下公式给出:



$$\Delta t = \frac{\tau}{N_r}$$

式中,  $\Delta t$  为采样时间增量;  $\tau$  为信号上升时间;  $N_r$  为每一个信号上升时间段的采样步数。

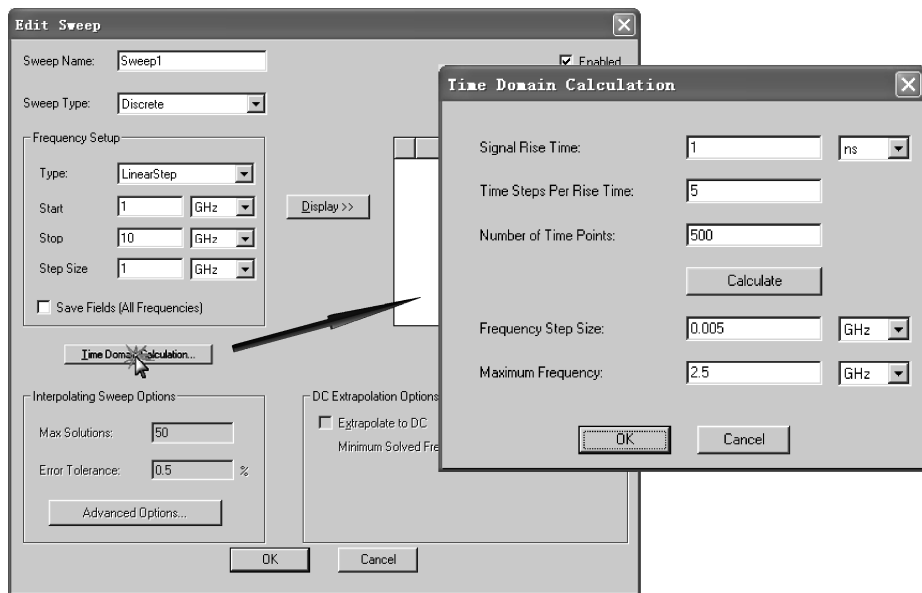


图 4-41 打开“Time Domain Calculation (时域计算器)”对话框

④ 在“Number of Time Points”一栏中输入时间点数  $N$  值, 用于计算输入信号持续时间  $N \times \Delta t$ 。

⑤ 单击“Calculate (计算)”按钮, 时域计算器会自动解算出时域分析时需要的最大频率和步进频率, 并分别显示在“Maximum Frequency”和“Frequency Step Size”栏中, 其计算公式为

$$f_{\max} = \frac{0.5}{\Delta t}, \quad f_{\text{step}} = \frac{f_{\max}}{N}$$

⑥ 单击“OK”按钮, 生成的数据将自动添加到扫频设置的相关选项中。

(6) Interpolating Sweep Options: 当选择了插值扫频模式时, 该项被激活, 并用来约束插值扫频求解过程, 其中“Max Solutions”项用来指定频带内需要求解的最大频点数, 其默认值为 50; “Error Tolerance”项为插值误差收敛标准, 其默认值为 0.5%。当插值扫频计算出的误差小于收敛标准或达到设置的最大频点数时, 插值扫频分析结束。

(7) DC Extrapolation Options: 直流扩展项。HFSS 不能直接计算直流时的解, 选中该项可以外插得到低频和直流点的解。其中“Minimum Solved Frequency”项用来设置扫频的最低频率, 其默认值为 100MHz。只有离散扫频和插值扫频模式才支持该功能。

完成扫频设置操作后, 设置的扫频设置会自动添加到工程树中的“Analysis”节点的对应的求解设置项下。用户可以双击该设置或选中对应的右键菜单中的命令对已添加的扫频设置进行查看和编辑。

工程树中新添加的扫频设置如图 4-42 所示。查看和修改已有扫频设置如图 4-43 所示。

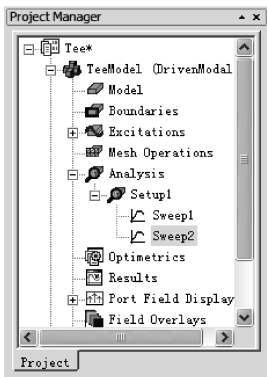


图 4-42 工程树中新添加的扫频设置

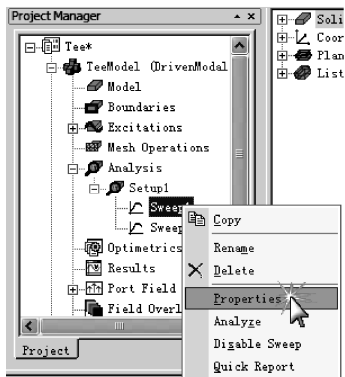


图 4-43 查看和修改已有扫频设置

## 2. 三种扫频模式的区别

### 1) 快速扫频 (Fast)

特点:

- (1) 在频率范围内只进行一次场求解;
- (2) 求解时间对扫频点数不敏感, 可以准确地表现近谐振特性;
- (3) 从中心频率场解外推出求解频率范围内其他频率的场解;
- (4) “求解设置”对话框的“General”选项卡中的“Solution Frequency”项设置的是扫频中心频点, 离开中心频率越远, 求解误差越大。

当仿真模型在扫频范围内有突变的谐振点或较大的频率响应时, 快速扫描能得到谐振点附近特性的精确表示。HFSS 采用频带的中心频点选择一个合适的特征值问题, 进而产生整个快速扫描的解。然后应用基于 Lanczos-Pade 扫描 (ALPS) 的求解器从中心频率场解来外推频带范围内其他频率的场。如果“Solution Frequency”项设置的频率位于扫描频带范围内 (大于最低频率, 小于最高频率), HFSS 将次频率作为中心频率, 否则频带范围的中点将被用做中心频率。

另外, 需要知道的是 HFSS 在分析自适应求解中使用有限元网格加密, 如果没要求自适应求解, 则使用初始网格进行扫频计算, 而不再进一步对其进行加密。因此, 中心频率的场解是最精确的。当然, 用户也可以指定其他频率为中心频点进行扫频计算, 默认只保存中心频率的场解, 而所有频率点的  $S$  参数都将被保存, 并且允许对扫描范围内的所有频率进行后处理操作。快速扫描所需要的时间远大于单个频率求解的时间。

### 2) 离散扫频 (Discrete)

特点:

- (1) 最好在频段内只有少数点需要准确计算的情况下使用;
- (2) 利用当前网格剖分, 逐点求解各个频点的电磁特性;
- (3) 求解时间与频点数成正比;
- (4) “求解设置”对话框的“General”选项卡中的“Solution Frequency”项可设置扫



频范围的最高点。

求解时，使用自适应网格计算扫描中每一个频点的场解。例如，指定频带为 1000~2000MHz，步长为 2.5，则会在 1000MHz, 1250MHz, 1500MHz, 1750MHz, 2000MHz 处产生解。默认情况下，将保存所有频率点的  $S$  参数，而只保存最后计算的频率点的场解。在这个例子中，2000MHz 时场的解被保存了。设置了求解频点后，如果想保存其他频点的场解，勾选“Save Fields”复选框即可。设置的求解频点越多，完成频率扫描所需的时间越长。

HFSS 的自适应求解需要利用有限元网格。如果不要求自适应求解，则扫频过程使用初始网格进行计算，不再进行网格细化，这是因为自适应求解只在设置的求解频率点上（“Solution Frequency”项设置的频率）进行网格优化，在远离该频率时结果将不如中心频点精确，由需要的求解精度决定。要想解决这一问题，可以先使用频带的中心频率为求解频率，然后查看计算结果，再将关注的频点设为求解频率进行扫频计算；或者干脆将需要求解的有限的少数几个频点分别设置成求解频率，运行多个单频求解。在工程应用中，可以设置中频偏高 1/3 处的频率进行自适应求解，能够获得较好的精度与速度的均衡。

### 3) 插值扫频 (Interpolating)

特点：

(1) 在给定的频率范围内，由 HFSS 利用当前剖分的网格，自动确定电磁场求解的频点，然后通过内插获得整个扫频范围内的频率响应；

(2) 插值扫描的精度可以通过“Error Tolerance”设置；

(3) “Solution Frequency”项设置的频率倾向频段高端位置时，可以在整个带宽内获得较好的精度；

(4) 适合于超宽带扫频。

使用插值扫频时，HFSS 计算相邻两个频点之间解的误差，当解达到指定的误差收敛标准或达到设定的最大频点数目时，扫频计算完成，其他频率点上的  $S$  参数和场解由内插给出。为了观察更多的信息，需要增加求解步数，然后再次运行扫频操作。

在频带范围很宽、频率响应光滑或快速扫频超出计算机资源的情况下，可以选择插值扫频模式。插值扫频方法比离散扫频所花费的时间要少，因此，其基于最少的频点在整个频段上插值产生解。插值扫频需要的时间是单频点求解时间乘以最大求解频点数目。如果不要求自适应求解，则扫频过程中使用初始网格，而不再进行网格细化。

## 4.5.5 仿真有效性验证与分析

当用户完成了创建模型结构、分配边界条件和激励方式，以及添加分析设置或扫频设置之后，接下来就可以运行仿真分析，对当前的设计进行仿真求解了。在运行仿真分析之前，通常还需要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，及时发现设计中是否存在问题。

### 1. 设计检查

#### 1) 自行检查

用户可以自行进行检查。为了方便用户快速浏览仿真设计的各种项目的设置情况，



HFSS 提供了列表的方式 (如图 4-44 所示), 用户可以在 Ansoft HFSS 的工程管理窗口的模型树中选中 “Analysis” 节点并单击鼠标右键, 然后在对应的右键快捷菜单中选择 “List...” 命令, 这样就可以浏览模型的各项参数的设置情况了, 包括模型成分及属性、边界条件、激励方式、网格操作和求解设置等。

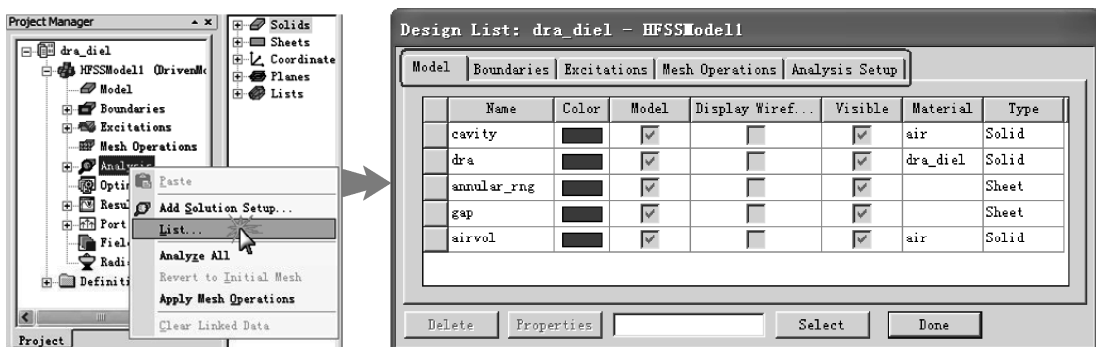



图 4-44 仿真设计列表

## 2) 自动检查

在主菜单栏中选择 “HFSS→Validation Check” 命令, 或者单击工具栏中的按钮, 便可以执行自动设计检查程序, 此时会弹出如图 4-45 所示的 “Validation Check (有效性验证)” 显示窗口。

HFSS 的设计验证内容包括 Design Settings (设计设置)、3D Model (三维模型)、Boundaries and Excitations (边界条件和激励设置)、Mesh Operations (网格剖分设置)、Analysis Setup (求解设置)、Optimetrics (优化设置) 和 Radiation (辐射球设置) 共 7 项。验证的结果有 3 种情况:

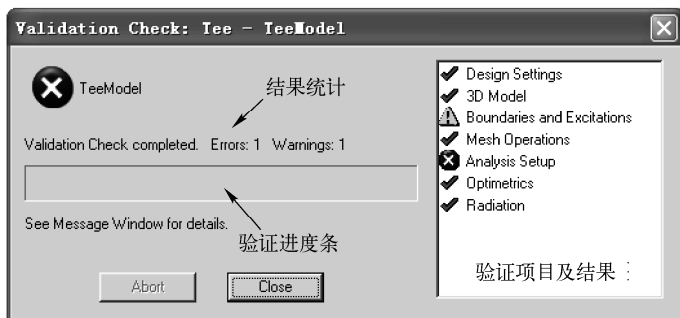





图 4-45 “Validation Check (有效性验证)” 显示窗口

- (1)  符号表示对应验证项目的操作步骤完整、正确;
- (2)  符号表示对应验证项目的操作步骤不完整或存在错误;
- (3)  符号表示对应验证项目的操作步骤存在不妥之处, 提出警告。

错误和警告的具体描述会相应地显示在软件界面下方的信息管理窗口中, 用户可以针对性地进行查看和处理。信息管理窗口中的有效性验证信息如图 4-46 所示。

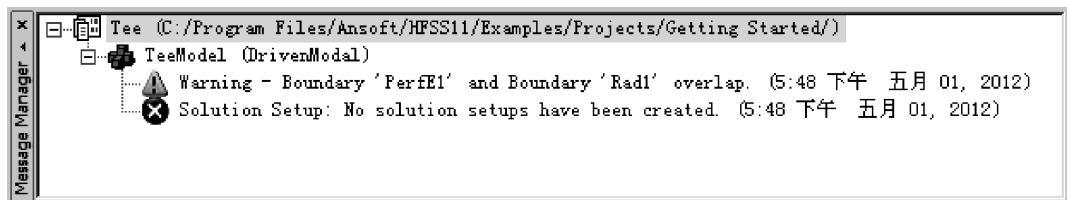


图 4-46 信息管理窗口中的有效性验证信息

当验证结果中有显示❌符号的项目时，HFSS 将无法进行仿真分析操作，直到错误得到改正为止；当有⚠️符号显示出来时，软件虽然可以进行仿真分析操作，但无法保证结果的精确性；只有当所有验证项目前显示的都是✅符号时，HFSS 的仿真分析才可以得到准确的结果。

## 2. 运行仿真分析

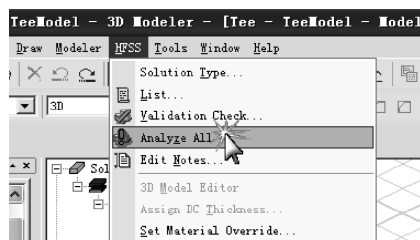
进行完有效性验证，解决完所有的问题，且验证各项前端均显示图标✅时，就可以对仿真模型进行分析计算了。当需要对设计中所有的求解设置进行计算时，HFSS 提供了以下 3 种途径（如图 4-47 所示）：

(1) 选择主菜单栏中的“HFSS→Analyze All”命令；

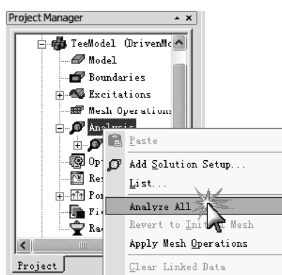
(2) 选中工程管理窗口中的“Analysis”节点，在对应的右键菜单中选择“Analysis All”命令；

(3) 单击工具栏中的🔍快捷方式按钮。

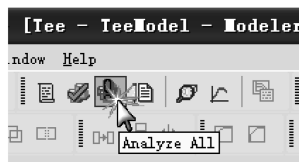
当只是需要计算求解设置中的某一个求解设置项时，可以在工程管理窗口中的“Analysis”节点下选中需要求解的求解设置，在对应的右键菜单中选择“Analysis”命令，则 HFSS 只计算选中的求解设置项，而不分析其他的求解设置。



方法一



方法二



方法三

图 4-47 运行所有求解设置方法

当仿真分析进行时，位于界面右下角的进程窗口会显示当前设计的仿真分析进度，而界面左下角的信息管理窗口会显示仿真分析的相关信息，如图 4-48 所示。

在仿真分析过程中，用户可以单击进度条右侧的按钮▶️，选择“Abort”命令来终止分析进程。当仿真分析顺利完成后，进度显示将消失并在信息管理窗口中显示分析已经完成；如果仿真分析出现了问题并自动终止，也会在信息管理窗口中显示出相关信息。

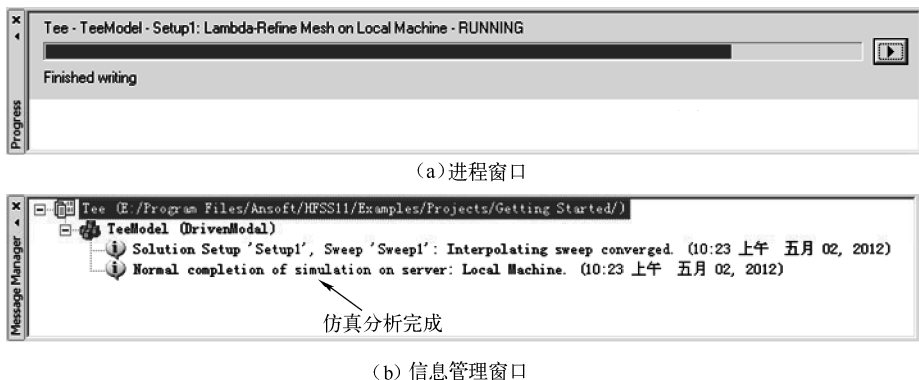


图 4-48 仿真分析时的进程窗口与信息窗口

#### 4.5.6 自适应迭代求解

一旦问题被正确地设定，HFSS 将自动完成全部或一次跨过几个步骤的求解过程，开始求解过程。由有限元的求解原理可知，有限元的求解时间与求解精度是一对矛盾，这是因为求解矩阵的复杂度与问题空间的网格剖分密度有密切的关系，网格剖分得越细，求解矩阵的未知数数目也就越多，求解所需的时间也就越长。但同时，有限元方法的求解精度也会随着未知数的增加而更加准确。为了取得两者之间的平衡，HFSS 采用了自适应迭代算法进行求解，如图 4-49 所示。

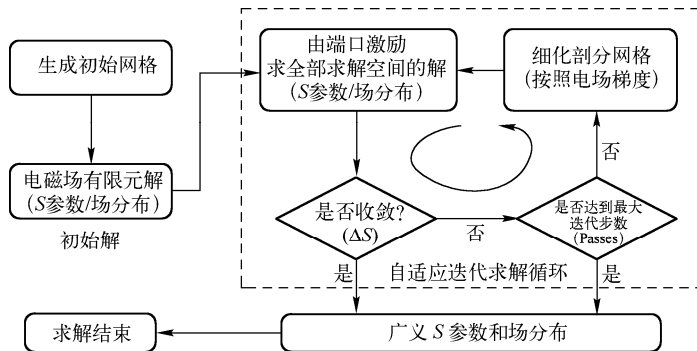


图 4-49 HFSS 的自适应迭代求解过程

从图 4-49 中可以看到该算法一开始先在较粗的网格剖分基础上进行求解，然后检验收敛性是否满足要求，如果不满足，则进一步细化剖分网格，再次求解并再次检验收敛性，如此迭代下去，直到达到需要的收敛精度为止。

##### 1. 自适应分析的一般步骤

###### (1) HFSS 生成初始网格。

(2) 在求解频率激励下，HFSS 利用初始网格计算结构内部的电磁场（如果需要进行扫频分析，则自适应求解仅对设置的求解频点进行）。



(3) 基于当前有限元的解, HFSS 估算与精确解有较大误差的求解区域, 并细化对应区域的网格。

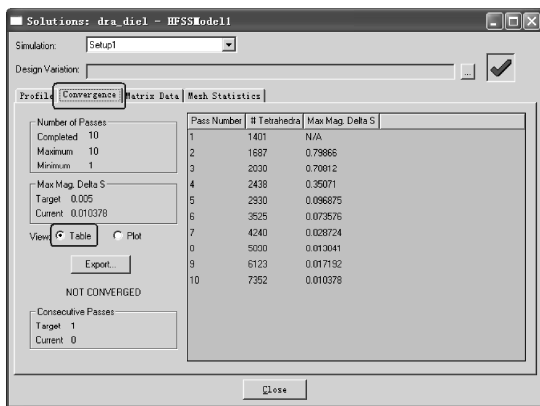
(4) 利用细化的网格得出新的解。

(5) 重新计算误差, 重复迭代过程, 直到满足收敛标准或达到设置的最大迭代步数为止。

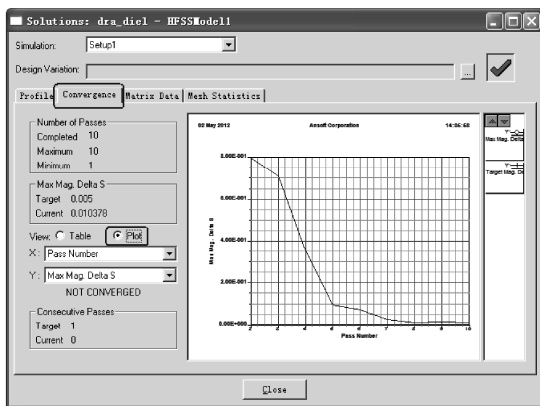
(6) 在此网格的基础上进行扫频分析, 不再进一步细化网格。

## 2. 监视收敛

虽然 HFSS 的自适应求解过程是自动完成的, 但用户仍然可以对其整个过程进行查看和监视。由于迭代次数和收敛精度这两个指标在解算过程中的关系是谁先达到, 分析就停止, 所以为了防止迭代次数到了, 但是迭代还没有收敛而影响计算精度的情况发生, 用户应在分析过程中和结束后首先查看分析的收敛情况。只需要在 HFSS 的工程管理树中选择“Analysis”节点下的“Setup”项的右键菜单中的“Convergence”命令, 就可以打开“Solutions”对话框, 观察整个求解过程的收敛情况。“Convergence”栏显示了每一次迭代后解的收敛精度。有两种显示方式: 一种是数据表格形式, 如图 4-50 (a) 所示; 另一种是图形曲线形式, 如图 4-50 (b) 所示。用户可以在“Solution”对话框中的“Convergence”选项卡的“View”复选框中选择“Table (表格)”或“Plot (图形)”形式来显示收敛精度。



(a) 数据表格



(b) 图形曲线

图 4-50 查看收敛精度

## 3. Profile 数据

在求解过程中或求解完成后, 用户都能够查看 HFSS 在每一步求解过程中的网格剖分和占用系统资源的情况。这些数据都显示在“Profile”栏中, 如图 4-51 所示, 显示的数据也可以看做 HFSS 的任务完成记录。这个记录指出了每完成一项任务所占用的时间, 需要的内存和硬盘空间等信息。用户还可以在“Solution Data”对话框中选择“Profile”选项卡来查看网格数量、矩阵大小、求解时间、内存消耗等。

(1) “Profile”选项卡中的“Task”列显示的是求解过程中所完成的软件模块任务和类型, 其中 g3dm\_vadapt 是软件模块, 该模块自适应地细分网格。

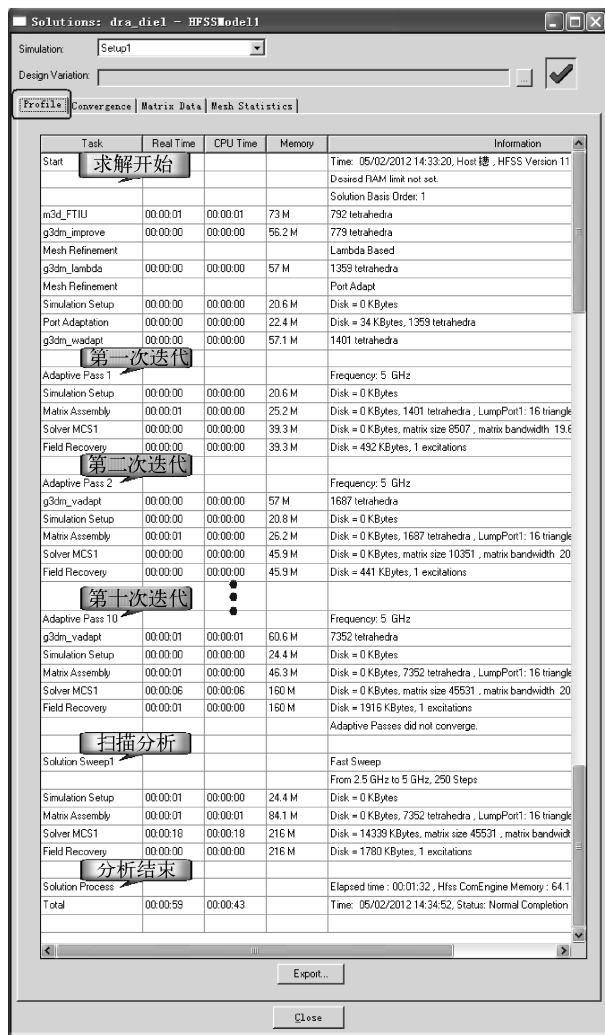


图 4-51 “Solutions” 对话框中的 “Profile” 选项卡

- (2) “Real Time” 是完成任务花费的实际时间;
- (3) “CPU Time” 是完成任务花费的 CPU 时间;
- (4) “Memory” 列是完成任务时本机使用的峰值内存, 该值包括所有同时运行程序所占用的内存, 并不仅限于 HFSS。
- (5) “Information” 列显示的是与解算相关的一般信息, 包括划分网格使用的四面体数量等。

## 第5章 仿真数据的后处理

### 5.1 后处理的方法及步骤

#### 5.1.1 后处理操作命令

仿真计算完成后，用户可以利用 HFSS 强大的数据后处理功能查看各种相关的结果。HFSS 的后处理命令主要集中在主菜单栏的“HFSS”菜单和工程管理窗口的“Results”节点对应的右键菜单中，部分命令在模型显示窗口的右键快捷菜单中也可以找到。选择相应的命令，可以实现对仿真数值结果，远、近场，天线参数及阵列，场分布等结果的查看和图形生成。HFSS 提供的后处理命令如图 5-1 所示。

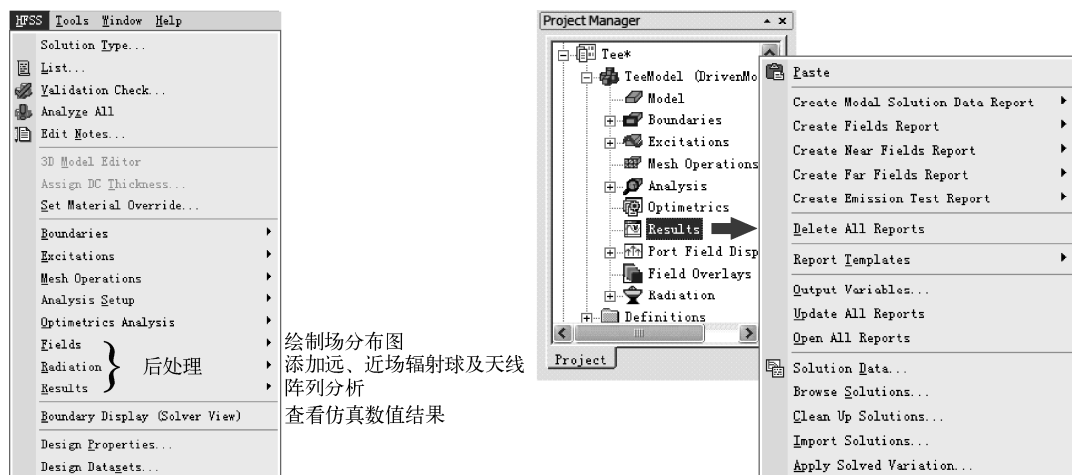


图 5-1 HFSS 提供的后处理命令

下面简单介绍一下各命令包含的内容和功能，详细的说明将在后续章节的使用中相应地给出。

主菜单栏的“HFSS”下拉菜单中的后处理命令如下所示。

(1) Fields: 用于绘制用户选中模型或平面的电场、磁场或电流的分布。它与模型显示窗口对应的右键菜单中的“Fields”命令具有相同功能。该命令的详细介绍将在 5.2 节中给出。

(2) Radiation: 当用户仿真分析辐射和散射问题时，用来指定远场的辐射表面和近场的计算区域；同时，它还是天线阵列后处理和天线参数命令的入口。

(3) Results: 该命令中包含多个子菜单和命令，用于查看和绘制各种分析解算数据。

① Create Modal Solution Data Report: 创建仿真求解数据报告。



- ② Create Fields Report: 创建场分布报告。
- ③ Create Near Fields Report: 创建近场分布报告。
- ④ Create Far Fields Report: 创建远场分布报告。
- ⑤ Delete All Reports: 删除所有报告。
- ⑥ Update All Reports: 刷新所有报告。
- ⑦ Open All Reports: 打开所有报告。
- ⑧ Solution Data...: 求解数据结果。
- ⑨ Clean Up Solutions...: 清除数据结果。
- ⑩ Import Solutions...: 导入数据结果。

### 5.1.2 数据的显示方式

HFSS 后处理结果的显示方式选择菜单都位于对应后处理参数命令后面的子菜单中, 其显示方式主要有以下几种。

- (1) Rectangular Plot: 直角坐标图。
- (2) Polar Plot: 极坐标图。
- (3) Radiation Pattern: 辐射方向图。
- (4) Data Table: 数据列表。
- (5) Smith Chart: 史密斯圆图。
- (6) 3D Rectangular Plot: 三维直角坐标图。
- (7) 3D Polar Plot: 三维球形坐标图。

## 5.2 查看求解信息

### 5.2.1 求解信息

仿真求解完成后或在求解过程中, 用户都可以通过选择“HFSS→Results→Solution Data...”命令, 进入“Solutions”对话框查看仿真求解数据, 如图 5-2 所示。该窗口显示的文件数据本质上是一个 HFSS 仿真在执行时的任务日志, 其中显示了求解时间长度、每个任务需要多少物理内存/磁盘存储器、模型网格剖分数量等信息。

由图 5-2 可见, “求解信息”显示窗口中共有 4 个选项卡, 如下所示。

(1) “Profile”选项卡: 用来显示整个自适应求解过程, 其中各项的含义在第 4 章中已经给出。

(2) “Convergence”选项卡: 用来查看和监视自适应求解的收敛情况。

(3) “Matrix Data”选项卡: 用矩阵列表的形式显示各参数的计算结果, 包括 S Matrix (散射矩阵)、Gamma (传播常数)、Y Matrix (导纳矩阵)、Zo (特性阻抗) 及 Z Matrix (阻抗矩阵) 等参数。

(4) “Mesh Statistics”选项卡: 用于显示与网格剖分相关的信息, 包括网格单元数目, 网格大小, 最大、最小网格棱边长度等。

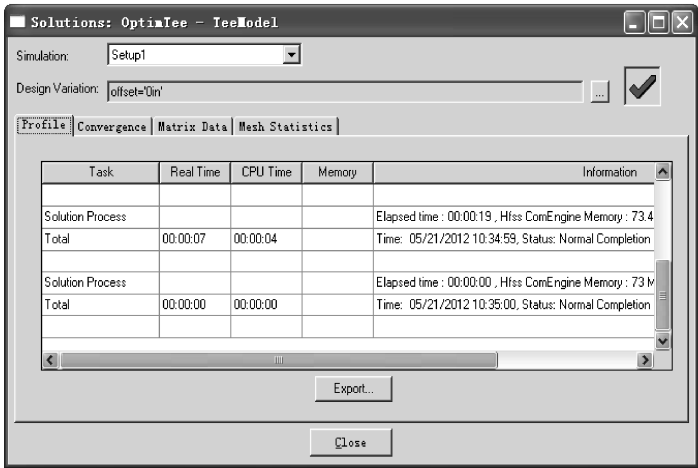


图 5-2 “Solutions” 对话框

下面重点介绍一下 “Matrix Data” 选项卡，如图 5-3 所示。

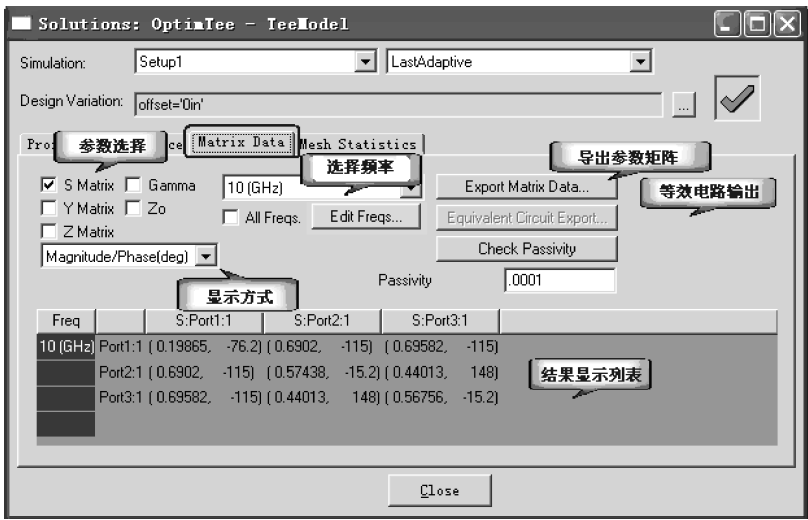


图 5-3 “Solutions” 对话框中的 “Matrix Data” 选项卡

在 “Simulation” 的下拉菜单中，用户可以选择查看某求解设置（左侧窗口）及单频求解的某一次 Pass（迭代）的自适应解或扫频解的 Matrix Data（右侧窗口）。

可以查看的参数类型有以下类型。

- (1) S Matrix：散射矩阵。
- (2) Gamma：传播常数。
- (3) Y Matrix：导纳矩阵。
- (4) Zo：特性阻抗。
- (5) Z Matrix：阻抗矩阵。

参数矩阵的显示方式有以下形式。





- (1) Magnitude/Phase: 幅度/相位。
- (2) Real/Imaginary: 实部/虚部。
- (3) dB/Phase: dB/相位。
- (4) Magnitude: 幅度。
- (5) Phase: 相位。
- (6) Real: 实部。
- (7) Imaginary: 虚部。

在使用“Matrix Data”选项卡时还需要注意的事项有:

- (1) 勾选“All Frequency”项, 将显示所有求解频率的参数矩阵;
- (2) 取消对“All Frequency”项的选择, 并选取某一频率, “Matrix Data”将显示对应频点的求解参数矩阵;
- (3) 对自适应求解来说, 仅求解设置中指定的求解频率可用; 对扫频而言, 整个扫频范围内的频率都可用;
- (4) 如果要删除或添加一个或多个显示频率, 可单击“Edit Freqs...”按钮进行设置, 该功能只在快速扫频和插值扫频模式下可用;
- (5) 当进行矩阵输出操作时, 频率列表中所有频点的所有参数被输出, 输出时可选的文件格式有 Touchstone (\*.snp)、Data Table (\*.tab)、Planar EM/HFSS v6+ (\*.szg)、Neutral Model Format (\*.nmf)、MATLAB (\*.m)及 Citifile (\*.cit)。

### 5.2.2 等效电路输出

Ansoft HFSS 可以提供全波 SPICE、集中参数和部分分数展开模型的等效电路输出。单击“Solution”对话框的“Matrix Data”选项卡中的 **Equivalent Circuit Export...** 按钮, 会出现“Equivalent Circuit Export Options (等效电路输出)”对话框, 如图 5-4 所示。

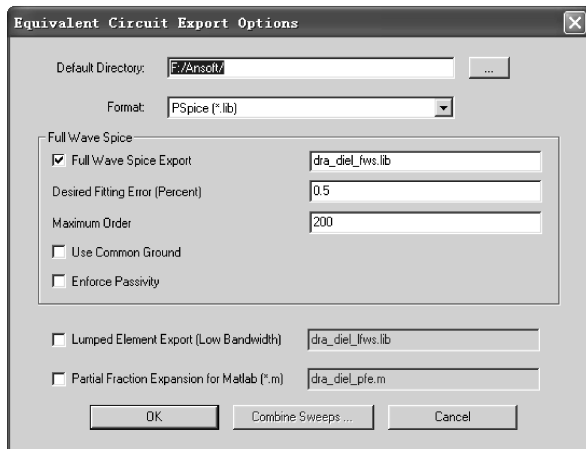


图 5-4 “Equivalent Circuit Export Options (等效电路输出)”对话框

等效电路输出的操作步骤如下。



(1) 在工程管理窗口中选中想要查看的求解设置，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Matrix Data”命令，会弹出“Solution Data”对话框，同时激活“Matrix Data”选项卡。

(2) 单击“Equivalent Circuit Export”按钮，弹出“Equivalent Circuit Export Options”对话框。

(3) 输入或选择文件保存路径。

(4) 在“Format”下拉菜单中选择想要保存的文件格式，所选择的文件格式将会决定“Full Wave Spice Export”项是否激活。

(5) 如果“Full Wave Spice Export”项被激活，勾选该复选框以激活文件名称等对应选项。

(6) “Equivalent Circuit Export Options”对话框的“Maximum Order”栏中有两项内容，其中“Use Common Ground”项用于为模型的所有端口指定负的参考点，“Enforce Passivity”项用于确保模型的无源特性。

(7) 如果希望保存的数据是由简单集总元件（电阻、电容、电感和相关的电流源）组成的低频电路模型，可以选择“Lumped Element Export (Low Bandwidth)”，该选项不支持Spectre格式输出。

(8) 选择“Partial Fraction Expansion for Matlab”则会产生一个\*.m文件，可以在Matlab软件中显示窄带模型的频率响应数据。

(9) 单击“OK”按钮，将S参数保存为指定的等效电路数据格式。

在驱动模式下，只要所有的端口激励模式一致，HFSS同样支持Equivalent Circuit Export（等效电路输出），但是HFSS在驱动模式下始终不支持差分对定义。如果有端口驱动解，可以输出PSpice PSpice, HSPICE, Spectre Spectre或Maxwell Spice；如果输出等效电路数据文件，仿真必须有5个频率点以上的扫频解；如果需要合并两个或两个以上的扫频结果，可以单击“Combine Sweeps”按钮。扫频范围内的最后一个频点的仿真结果也将被保存，但是公共频点不会重叠。

## 5.3 查看数值结果

### 5.3.1 数值结果类型

HFSS在不同求解模式下，后处理数值结果的参数类型稍微有所不同。在各种求解模式下，数据后处理中能够显示的数值结果类型如下所示。

#### 1. 模式驱动求解 (Driven Modal Solution)

(1) Variables（参数变量）。

(2) Output Variables（用户自定义的输出变量）。

(3) S-parameters（散射参数）。

(4) Y-parameters（导纳参数）。

(5) Z-parameters（阻抗参数）。



- (6) VSWR (电压驻波比)。
- (7) Gamma (复数形式的传播常数)。
- (8) Port Zo (端口波阻抗)。

## 2. 终端驱动求解 (Driven Terminal Solution)

- (1) Variables (参数变量)。
- (2) Output Variables (用户自定义的输出变量)。
- (3) S-parameters (散射参数)。
- (4) Y-parameters (导纳参数)。
- (5) Z-parameters (阻抗参数)。
- (6) VSWR (电压驻波比)。
- (7) Power (功率)。
- (8) Voltage Transform matrix (T) (电压传输矩阵)。
- (9) Terminal Port Zo (端口波阻抗)。

## 3. Eigenmode solution (本征模解)

Eigenmode Parameters (modes) (本征模参数)。

以上求解模式中的散射参数、导纳参数、阻抗参数及电压驻波比的计算都建立在理想的入射和反射波关系的基础上,即对于多端口问题,当计算某一端口的网络参数时,是建立在其他端口都连接匹配负载的基础上的,并且不考虑多端口之间的耦合影响。为了真实地反映多端口网络实际特性, HFSS 增加了 Active 参数计算。对于具有  $N$  个端口的网络来说,考虑端口耦合影响的网络参数分别表示为

$$\text{Active}S_{mm} = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{a_k}{a_m} S_{mk} \right] \quad (5-1)$$

$$\text{Active}Y_{mm} = \frac{1}{\text{Active}Z_{mm}} \quad (5-2)$$

$$\text{Active}Z_{mm} = Z_{0(m)} \left[ \frac{1 + \text{Active}S_{mm}}{1 - \text{Active}S_{mm}} \right] \quad (5-3)$$

$$\text{ActiveVSWR} = \frac{1 + \text{mag}(\text{Active}S_{mm})}{1 - \text{mag}(\text{Active}S_{mm})} \quad (5-4)$$

式中,假设  $a_k$  为第  $k$  个端口激励的幅度和相位的复数表达式;  $Z_{0(m)}$  为第  $m$  个端口的特性阻抗。

### 5.3.2 自定义输出变量

在数据后处理过程中,用户除了可以查看 HFSS 系统自有的参数结果外,还可以根据需要利用数学公式、函数等对系统自有的参数进行编辑,以生成用户需要的、直观和便于处理的自定义输出变量。

添加自定义变量:首先在工程管理窗口中的“Results”节点处单击鼠标右键,在弹出的



快捷菜单中选择“Output Variables”命令，打开“Output Variables（输出变量）”对话框，如图 5-5 所示。

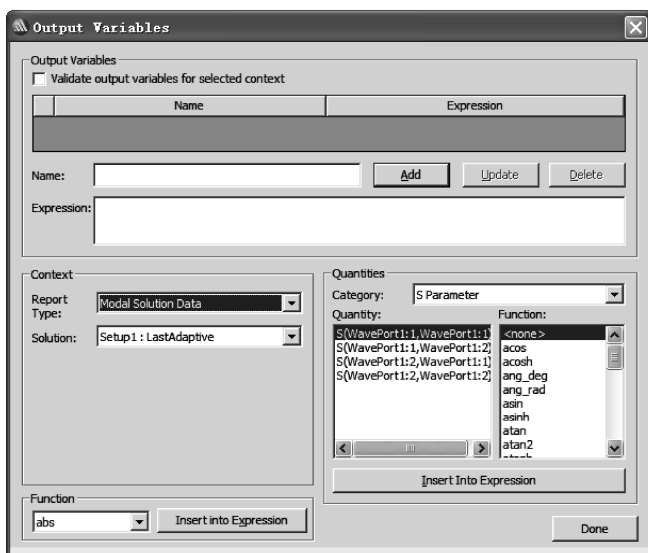


图 5-5 “Output Variables（输出变量）”对话框

该对话框中各部分的功能说明如下。

- (1) Out Variables: 已定义的输出变量列表。
- (2) Name: 为定义的输出变量命名。
- (3) Expression: 输出变量表达式编辑窗口。
- (4) Context: 选择后处理数据结果类型及相关求解项。
- (5) Quantities: 选择所需的具体参数类型、名称及单位。单击“Insert Into Expression”按钮便可以将所选参数表达式输入列输出变量表达式编辑窗口，从而省去了用户自己编写参数表达式的不便，也避免了错误表达式的出现。

(6) Function: 为输出变量添加函数表达式。单击“Insert Into Expression”按钮输入编辑窗口。

(7) Add: 添加编辑好的输出变量至输出变量列表窗口，同时清空“Name”和“Expression”栏，为继续添加变量做准备。

以添加天线归一化增益参数为例，具体的添加步骤如下。

- (1) 在①处选择后处理报告数据类型为 Far Fields。
- (2) 在②处选择参数类型为 Gain。
- (3) 在③处选择参数名称为 GainTotal，指定单位为 dB。
- (4) 单击④处的按钮，会在“Expression”栏中输入所选参数的表达式，为 dB (GainTotal)。
- (5) 在⑤处的表达式 dB (GainTotal) 后输入“-max ()”，并将光标置于括号内，再次单击④处的“Insert Into Expression”按钮输入变量表达式。

(6) 单击⑥处的“Add”按钮，将定义的名称为 GaindB\_0 的输出变量添加到自定义输出变量列表⑦中。

(7) 在⑦处的列表中，可以查看定义的变量。

单击“Update”按钮可以对变量进行修改，单击“Delete”按钮可以删除所选变量。定义完的输出变量形式如图 5-6 所示。

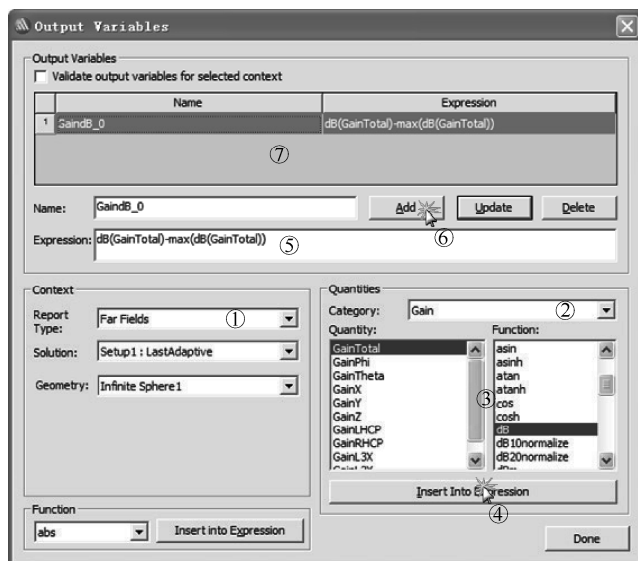


图 5-6 自定义归一化增益输出变量

查看数值结果是每一次仿真分析完成后都会用到的操作，这里不再介绍具体的操作步骤，在后续章节中会结合具体的仿真实例展示具体的查看方法。

## 5.4 查看场分布

在 HFSS 的数据后处理中，除了可以查看数据仿真结果外，还可以绘制模型表面或模型内部的电磁场分布图，这样用户可以直观地查看关注位置的电磁场分布情况，还可以进行动态显示以展示模型工作时的电磁性能。可以选择用标量或矢量形式来显示场分布，其中标量形式采用阴影线条来绘制模型电磁场的大小和分布，矢量形式采用带箭头的有向线段来表示电磁场的大小和分布。

### 5.4.1 场量类型

HFSS 默认的场量定义和单位如表 5-1 所示。

表 5-1 HFSS 默认的场量定义和单位

场量类型	场量	定义	单位
电场 ( $E$ )	Mag_E	电场幅度, $ E  (x,y,z)$	V/m
	ComplexMag_E	电场复振幅, $ E  (x,y,z)$	V/m

续表

场量类型	场量	定义	单位
电场 ( $E$ )	Vector_E	电场矢量, $E(x,y,z)$	V/m
磁场 ( $H$ )	Mag_H	电场幅度, $ H (x,y,z)$	A/m
	ComplexMag_H	电场复振幅, $ H (x,y,z)$	A/m
	Vector_H	电场矢量, $H(x,y,z)$	A/m
体电流密度 ( $J$ )	Mag_Jvol	体电流密度幅度 $ J (x,y,z)$	A/m <sup>2</sup>
	ComplexMag_Jvol	体电流密度复振幅 $ J (x,y,z)$	A/m <sup>2</sup>
	Vector_Jvol	体电流密度矢量 $J(x,y,z)$	A/m <sup>2</sup>
面电流密度 ( $J$ )	Mag_Jsurf	面电流密度幅度 $ J (x,y,z)$	A/m
	ComplexMag_Jsurf	面电流密度复振幅 $ J (x,y,z)$	A/m
	Vector_Jsurf	面电流密度矢量 $J(x,y,z)$	A/m
其他 (other)	Vector_Real Poynting	坡印亭矢量, $E \times H^*$	W/m <sup>2</sup>
	Local_SAR	比吸收率	W/kg
	Average_SAR	平均比吸收率	W/kg
	Surface_Loss_Density	表面功率损耗密度	W/m
	Volume_Loss_Density	体功率损耗密度	W/m <sup>2</sup>

表中, SAR (比吸收率) 的全称为 Specific Absorption Rate, 是衡量有耗介质材料吸收电磁辐射能量多少的一个物理量, 其单位为瓦/千克 (W/kg)。HFSS 利用以下公式计算物体表面或内部与标量场相关的 SAR 值:

$$SAR = \sigma \cdot \frac{E^2}{2\rho} \quad (5-5)$$

式中,  $\sigma$  为介质材料的电导率;  $\rho$  为介质材料的质量密度, 以单位体积内的质量为单位。

对于局部 SAR 值的计算, HFSS 首先用上述公式计算每个网格节点处的 SAR 值, 然后用内插法计算网格节点以外区域的节点的 SAR 值; 对于平均 SAR, HFSS 计算的是每个节点所在区域上平均的 SAR 值, 计算区域的大小由用户设定的介质材料质量和密度决定。

#### 5.4.2 场图绘制

在 HFSS 中, 绘制场分布图的步骤大体可以分为以下几步。

第一步: 选中需要创建场分布的三维模型或模型的某一个面, 如图 5-7 所示。

第二步: 通过以下方式中的任意一种选择需要绘制的场量类型 (如图 5-8 所示)。

(1) 选中工程管理窗口中的 “Field Overlays” 节点, 在对应的右键快捷菜单中选择 “Plot Fields” 命令子菜单中对应的场量类型。

(2) 从主菜单栏中选择 “HFSS→Field→Plot Fields” 命令子菜单中对应的场量类型。

(3) 在显示窗口单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 “Plot Fields” 命令子菜单中对应的场量类型。

例如, 绘制波导体内或波导腔内壁的电场幅度瞬时分布, 可以选择 “Plot Fields→E→

Mag\_E”命令，效果如图 5-9 所示。

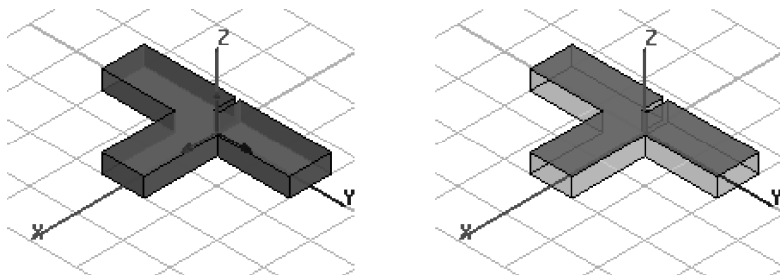


图 5-7 选择三维模型或模型表面

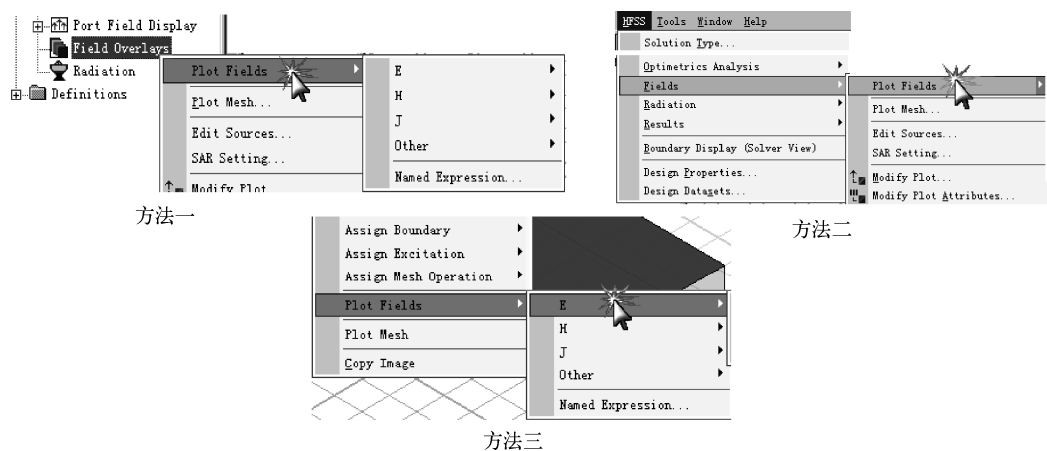


图 5-8 场量类型选择方式

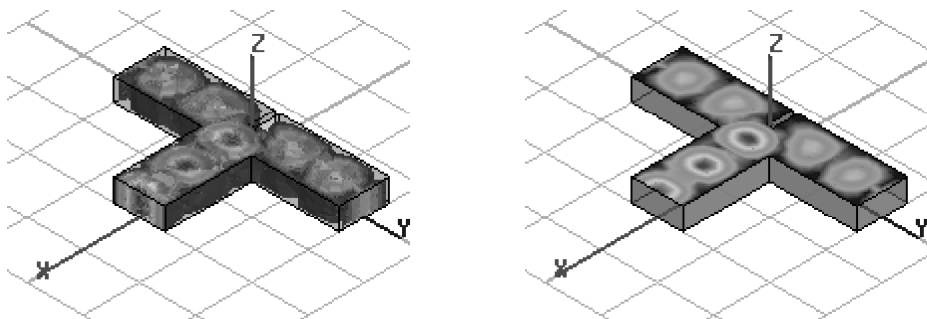


图 5-9 波导体内或波导腔内壁的电场幅度瞬时分布图

第三步：编辑图形属性。当第二步命令执行后，在选中的模型或平面上将出现选择的场量分布图，同时自动添加在工程管理树中的“Field Overlays”节点下。通过选择对应场分布图名称的右键菜单中的命令可以对其进行编辑和修改。

第四步：编辑场分布属性。还可以选中“Field Overlays”节点，在其右键快捷菜单中选择“Modify Attributes...”命令对不同类型的场量分布图进行全局属性编辑，以使场分布图

达到最佳的显示效果，如图 5-10 所示。

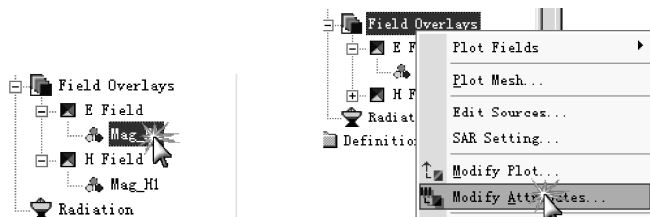


图 5-10 查看和编辑场分布图属性

### 5.4.3 动态显示

前面介绍的只是场量的静态显示，HFSS 的数据后处理模块还提供了场分布的动态显示功能——Animate 命令，从而实现了场分布随不同变量因子动态变化。变量类型可以是工作频率、相位、参数变量等。

要想进行场分布的动态显示，首先在“Field Overlays”节点下选中需要进行动态显示的场分布名称，然后在对应的右键快捷菜单中选择“Animate...”命令，在弹出的“Select Animation”对话框中单击“New”按钮，再在弹出的“Setup Animation”对话框中设置动态显示参数，最后单击“OK”按钮进行动态显示，如图 5-11 所示。同时，会弹出动态显示控制台，用户可以控制动态显示的速度、开始、前进和后退等。

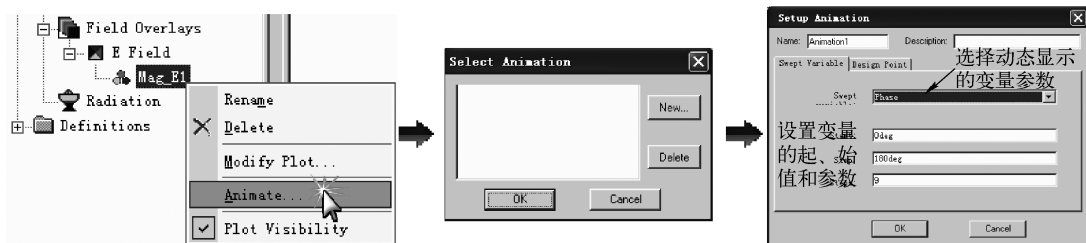


图 5-11 场分布的动态显示操作

创建动态显示的步骤如下：

- (1) 创建所需的二维或三维场分布图。
- (2) 在工程管理窗口中的“Field Overlays”节点下选中想要创建动画的场分布名称。
- (3) 单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Animate”命令，弹出“Setup Animation”对话框。
- (4) 在“Setup Animation”对话框中输入动画名称、动态变量、变量的起始和结束数值及步数，如选择变量为 phase（相位），开始值是 0，停止值是 180，步数是 10，则将动态显示场在 0 到 180° 相位之间的分布情况，且开始值将显示第 1 帧，总共有 11 帧的动画。
- (5) 单击“OK”按钮确定。
- (6) 在视图窗口中便开始动态显示场分布情况，同时，在窗口左上角会弹出动画显示控制面板，也叫播放面板，如图 5-12 所示。该面板上有按钮，可以控制帧播放的速度和顺



序, 启动和停止动画及导出动画。

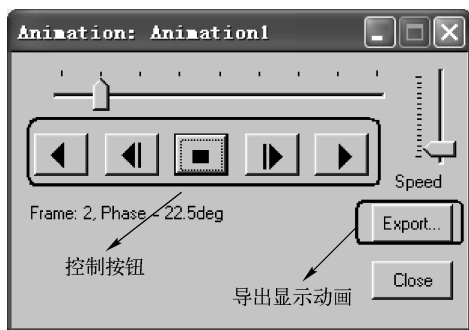


图 5-12 动态显示控制面板




#### 特别说明

在动态显示控制面板中有一个很有用的功能按钮, 就是“Export...”按钮, 单击此按钮可以将生成的显示动画以.gif 或.avi 视频格式导出和保存, 导出的视频动画文件可以完全脱离 HFSS 运行环境进行播放, 极大地方便了 HFSS 仿真结果的动态演示。

## 5.5 场计算器的使用

### 5.5.1 功能介绍

HFSS 的强大的后处理模块除了提供默认的场量分析外, 还提供了场计算器功能, 用来计算用户感兴趣的场量。用户可以通过以下任意一种方式打开“场计算器”对话框进行编辑:

- (1) 选择主菜单栏中的“HFSS Fields Calculator”命令;
  - (2) 单击工具栏中的快捷按钮.
  - (3) 在工程管理窗口的“Field Overlay”节点对应的右键菜单中选择“Calculator”命令。
- 执行以上任意操作都可以打开“场计算器”对话框, 其窗口界面如图 5-13 所示。

由图 5-13 可见, 整个场计算器窗口主要由表达式操作区、数据关联选择区、场计算器操作区和算式输入区/栈区四部分组成。下面分别介绍各部分的具体功能和用法。

#### 1. 表达式操作区

表达式操作区如图 5-14 所示。

功能一: 建立表达式

- (1) 使用“Add...”按钮, 从场计算器堆栈里导入所需的表达式。
- (2) 使用“Load From...”按钮, 通过导入场计算器中的表达式文件 (\*.clc) 建立所需的表达式。

功能二: 输出表达式

- (1) 使用“Copy to stack”按钮, 将已存在的表达式导出到算式输入区/栈区。

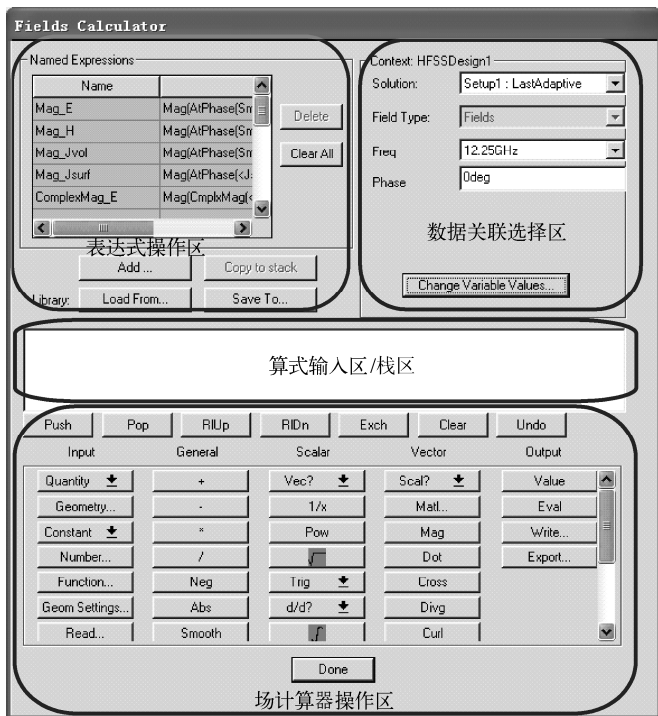


图 5-13 “场计算器”对话框的窗口界面

(2) 使用“Save To”按钮，将已存在的表达式保存成场计算器表达式文件 (\*.clc)。

## 2. 数据关联选择区

数据关联选择区如图 5-15 所示。

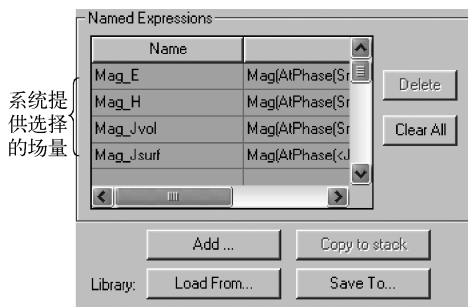


图 5-14 表达式操作区

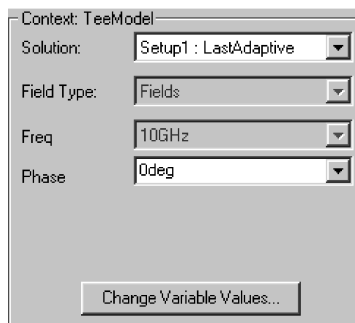


图 5-15 数据关联选择区

数据关联选择区主要用来指定场计算器使用数据的出处，包括指定求解设置、指定场类型、指定频率及指定相位。

## 3. 算式输入区/栈区

通过一系列输入、运算操作之后，各种算式将会在算式输入区/栈区以多行的形式显

示, 如图 5-16 所示。

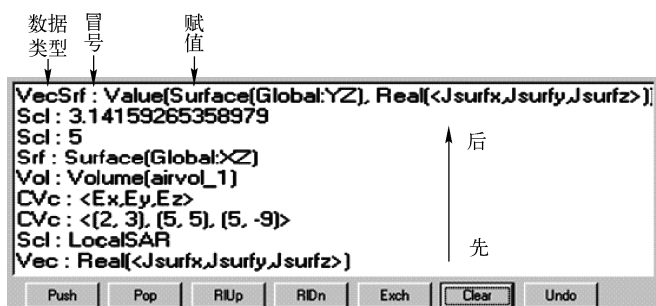


图 5-16 算式输入区/栈区的数据类型、格式及顺序

其先、后关系按照由下至上的顺序排列, 即最下面的算式是最先输入的, 最上面的算式是最后输入的, 这与我们平时的习惯正好相反, 需要特别留意。

栈区中的数据格式为: 左边是数据类型, 右边是相应的赋值, 中间用冒号隔开。

数据类型共分为三大类: Quantity, Geometry, Combination。

(1) Quantity 主要是场数据、用户自定义的数据或先前操作的数据结果。

- ① Csc 表示标量复数, 形式为 (Re, Im)。
- ② CVc 表示矢量复数, 形式为 (Vx, Vy, Vz), Vx = (Re, Im)。
- ③ Vec 表示三维矢量, 形式为 (Vx, Vy, Vz), 其中 Vx 等是标量。
- ④ Scl 表示标量值。

(2) Geometry 是几何结构。

- ① Vol 表示几何体, 一般为物体名称。
- ② Srf 表示面, 既可以是单独的面, 也可以是几何体上的其中一面。
- ③ Lin 表示线, 既可以是封闭的, 也可以是开放的。
- ④ Pnt 表示点。

(3) Combination 是在一定区域内的数据, 如 SclSrf 在一个几何面上的标量数据。

数据类型转换: 数据类型在进行一定操作之后会发生自动转换。

- ① 基于操作的变换, 如两个矢量进行点乘变成标量。
- ② 类型组合, 如在几何表面 Srf 上取矢量 Vec 的值 Value, 得到 VecSrf 数据。
- ③ 几何类型数据一般不能转换。

在场计算器中, 大多数操作都只能针对特定类型的数据, 并归类于场计算器中的某一栏。

- ① General 操作可针对不同类型的数据。
- ② Vector 操作只能作用于矢量数据。
- ③ Scalar 操作只能作用于标量数据。

如图 5-17 所示是对数据类型、操作、类型转换的一个简单总结。

#### 4. 场计算器操作区

场计算器操作区如图 5-18 所示。

DATA CONVERSION		Convert To....			
		Cvc	Csc	Vec	ScI
Converting From...	Cvc		Mag (vector mag) or Scal? > X, Y, or Z	Complex > Real, Imag, CmplxMag, CmplxPhase, or AtPhase	(No Single Operation)
	Csc	Vec? > X, Y, or Z		(No Single Operation)	Complex > Real, Imag, CmplxMag, CmplxPhase, or AtPhase
	Vec	Complex > ComplexReal or ComplexImag	(No Single Operation)		Mag (vector mag) or Scal? > X, Y, or Z
	ScI	(No Single Operation)	Complex > ComplexReal or ComplexImag	Vec? > X, Y, or Z	

图 5-17 数据类型转换

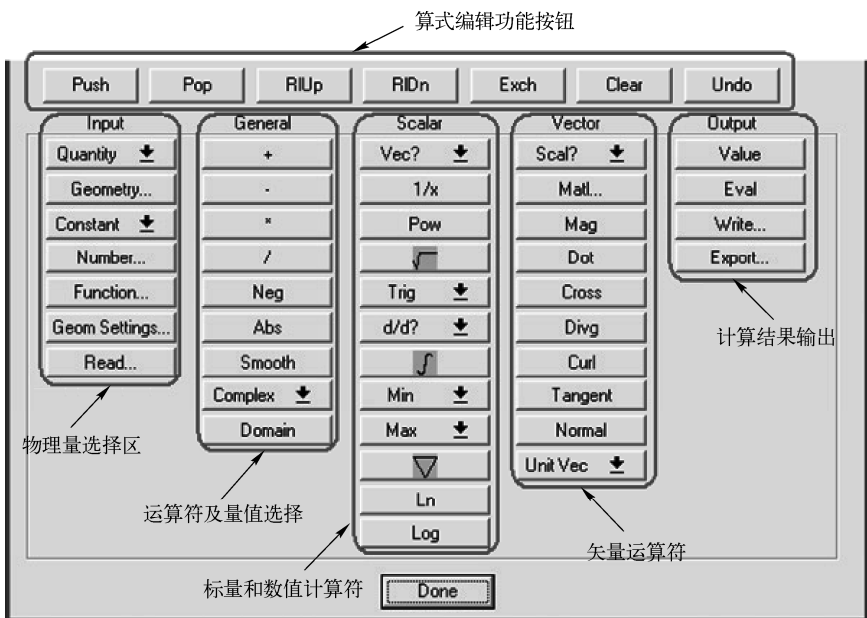


图 5-18 场计算器操作区

场计算器操作区中包括以下内容。

#### 1) 算式编辑区

算式编辑区操作是通过其底部的一排按钮实现的，如图 5-19 所示。



图 5-19 算式编辑功能按钮

各按钮的功能如下。

(1) Push: 压栈，将算式显示区的第一行压入栈区作为缓存。



- (2) Pop: 出栈, 将栈区中的算式弹出进入算式输入区, 算式中原有的第一行将被删除。
- (3) Rlup: 向上滚动, 栈区顶行移动到栈区底部, 栈区内的其他部分上移。
- (4) Rldn: 向下滚动, 栈区底行移动到栈区顶部, 栈区内的其他部分下移。
- (5) Exch: 交换, 算式区的第一行和第二行上下交换。
- (6) Clear: 清除, 清除算式输入区的公式。
- (7) Undo: 撤销上一步操作。

## 2) 物理量选择区

输入栏“Input”包括所有计算所需的物理量: 场数据, 几何结构数据, 数值。单击“Quantity”的下拉菜单, 可以输入当前工程的场数据(如电场、磁场、坡印廷矢量等)。所有物理量的输入都是基于当前的激励情况(通过“HFSS→Fieldst→Edit Source”可以更改场的激励)的。物理量选择区的按钮如图 5-20 所示。

各按钮的功能如下。

- (1) Geometry...: 计算中所用到的几何结构。
- (2) Constant: 选择在物理和电磁场中常用的常数, 如 Pi, E0, U0, C 等。
- (3) Number...: 输入标量、矢量、复数等计算中用到的数。
- (4) Function...: 调用预先定义的变量和 HFSS 内部保留的变量。
- (5) Geometry Settings...: 设置几何结构的采样点数。
- (6) Read...: 导入外部数据。

## 3) 通用运算符及量值选择区

通用运算符及量值选择区的按钮如图 5-21 所示, 各按钮的功能如下。

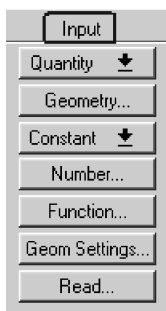


图 5-20 物理量选择区的按钮



图 5-21 通用运算符及量值选择区的按钮

- (1) + (plus) 相加运算: 寄存器之间的加法运算, 数据可以是矢量、标量、复数或实数, 但两者必须一致。
- (2) - (minus) 相减运算: 算式输入区的第一行减去第二行, 数据可以是矢量、标量、复数或实数, 但两者必须一致。
- (3) x (multiply) 相乘运算: 算式输入区的第一行乘以第二行, 其中一行必须是标量, 另一行既可以是标量, 也可以是矢量, 但必须是实数。

(4) / (divide) 相除运算：算式输入区的第一行除以第二行，其中一行必须是标量，另一行既可以是标量，也可以是矢量，但必须是实数。

(5) Neg 取负：在第一行的算式前加负号，可用于矢量、复数、标量。

(6) Abs 取绝对值：对第一行的算式取绝对值，可用于矢量、复数、标量。

(7) Smooth 平滑：对第一行的算式进行平滑操作。

(8) Complex：对第一行的算式进行复数运算，对应的下拉菜单中各命令的含义如下。

① Real 和 Imag：取复数的实部和虚部。

② Complex Mag：取复数的幅度值（矢量或标量）。

③ ComplexPhase：取复数的幅度值（矢量或标量）。

④ Conj：取复数的共轭，如复数  $C = A + jB$ ，取共轭计算后  $C^* = A - jB$ 。

⑤ AtPhase：取特定相位下的场量。

⑥ ComplexReal 和 ComplexImag：将第一行的标量（矢量或非矢量）转化为某一复数的实部和虚部值。通常将其作用于只读数据，以便进行复数操作。

(9) Domain：为算式中的场量限定空间，在作图或计算时，将计算在限定的空间进行。其使用方法：首先建立算式，得到所需的场量；然后在“Geometry...”中选定三维物体；最后单击“Domain”。

#### 4) 标量操作

如图 5-22 所示，标量操作区的按钮的具体功能如下所示。

(1) Vec?：作用于第一行的标量或复数标量，使其变为矢量的相应某一个分量（数据将变为矢量或复矢量）。

(2) 1/x：倒数，即求算式的倒数、复数或实数。

(3) Pow：乘方，输入次序为首先填入底数；然后填入乘方数；再单击[Pow]，显示出乘方式。

(4)  $\sqrt{\quad}$ ：开平方。

(5) Trig：输入三角函数运算符 sin, cos, tan, asin, acos, atan 和 atan2，作用于第一行的实数数据，以弧度为单位。atan 的角度范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ ，atan2 的角度范围为  $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。

(6) d/d?：对 X, Y, 或 Z 进行微分运算。

(7)  $\int$ ：积分运算，可在线、面或体上对各种物理量进行积分运算。在第一行上显示几何结构，第二行输入积分计算的物理量。计算输入次序：首先建立算式，得到所需的场量，然后在“Geometry...”中选定积分计算的几何体（线、面或体），再单击  $\int$  积分命令进行积分运算，得到积分算式，最后单击[Eval]得到积分数值。



**注意**

当对复数进行积分运算时，可对实部和虚部分开操作，然后再通过 ComplexReal 和 ComplexImag 进行操作得到完整的结果。

(8) Min 和 Max：均包含 Value 和 Position 两个操作。可以得到最小和最大的场数据和位置。该操作对象必须是非复数标量并限于某些特定操作（Domain 或 Value），如 SclLin, SclSrf, SclVol。

(9)  $\nabla$ : 梯度计算, 操作对象可以是复数, 结果数据是矢量。

(10) Ln 和 Log: 自然对数计算和常用对数计算, 两者的操作对象是实数、正标量数据 (如果对一个常量取对数, 必须先通过 Abs 操作取绝对值, 确保数据非负)。

### 5) 矢量操作区

矢量操作区的按钮如图 5-23 所示, 其具体功能如下所示。

(1) Scal?: 求矢量的幅度, 可选 X, Y 或 Z 分量。

(2) Matl...: 第一行的算式与材料特性进行乘除运算。输入过程为: 选择“Matl...”按钮, 弹出“Material Operation”对话框, 在“Material Operation”对话框中选择材料特性[材料特性包括: Permittivity (epsi), 为相对介电常数; Permeability (mu), 为相对磁导率; Conductivity, 为电导率; Omega( $\omega$ ), 为角频率]; 在“Operation”项勾选“Multiply”或“Divide”复选框。

(3) Mag: 求矢量算式的幅度, 不影响复数形式。

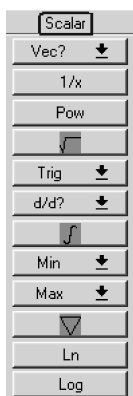


图 5-22 标量操作区的按钮



图 5-23 矢量操作区的按钮

(4) Dot 和 Cross: 点乘和叉乘。Dot 操作后的结果变为标量 (实数或复数, 依赖于操作的矢量形式)。

(5) Divg (Divergence) 和 Curl: 计算矢量的散度和旋度。Divg 操作后的结果为标量。

(6) Tangent: 计算矢量在曲线上的切向分量。计算过程为: 建立矢量算式; 通过 [Geometry/Line] 选择物体; 选择 [Tangent] 计算切向分量。

(7) Normal: 计算物体表面或曲面上的法向分量。

(8) Unit Vec 可以通过子菜单中的“Tangent”和“Normal”命令求切向或法向单位矢量。其中“Tangent”为求切向单位矢量命令; “Normal”为求法向单位矢量命令。

### 6) 计算结果输出区

计算结果输出区的按钮如图 5-24 所示, 各按钮的具体功能如下所示。

(1) Value: 计算空间某点的场量值, 场量幅度值, 场量的 X、Y、Z 分量。第二行输入的数据可以是矢量或标量, 但必须是实数。第一行的几何图形可以是任意 (点、面、线或体) 的。

(2) Eval: 得到积分运算、最大值、最小值等数值计算结果, 不显示单位。只能对单个数据进行处理, 数据格式可以是标量、复数、矢量。

(3) Write: 将算式计算的结果以文件形式存盘, 以供 HFSS 之外所用。



(4) Export: 将算式得到的场量按坐标范围输出。使用的参考坐标系如图 5-25 所示。场量输出操作步骤如图 5-26 所示。



图 5-24 计算结果输出区的按钮

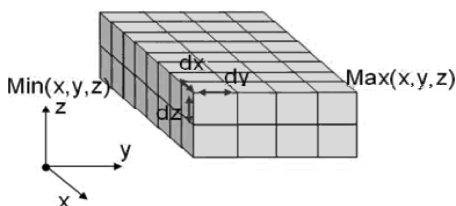


图 5-25 场量输出时使用的参考坐标系

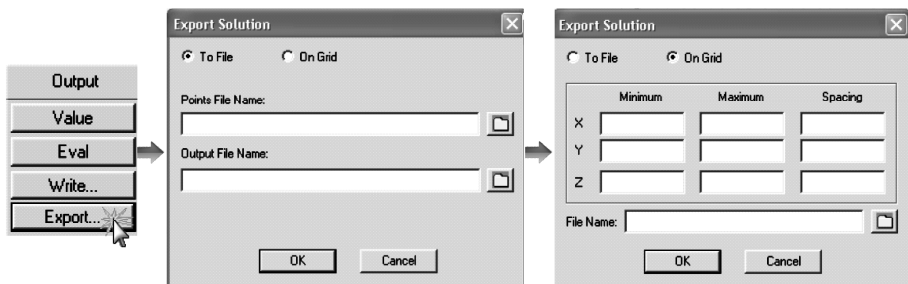


图 5-26 场量输出操作步骤

## 5.5.2 图形报告

计算器中计算的结果既可以显示为数值形式，也可以在 Report Editor 中显示为图形格式。创建场结果图形报告的操作如下：

- (1) 利用场计算器生成一个场量计算并为其命名；
- (2) 在当前设计中作一条线（模型或非模型属性都可以）；
- (3) 在结果报告中将已命名的场量在线上作图。

在工程树的“Result”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Fields Report”命令子菜单中的“Rectangular Plot”命令，在弹出的“Report”对话框中的“Context”栏选择创建的线段，在“Category”栏选择“Calculator Expressions”，在“Quantity”栏选择命名过的场量，创建图形报告，如图 5-27 所示。

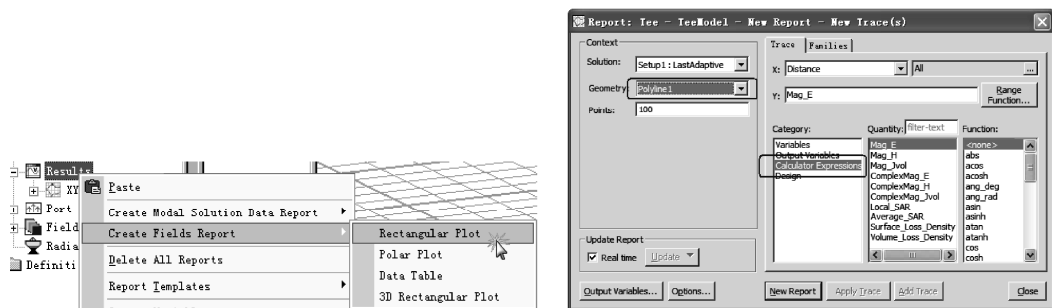


图 5-27 创建场结果图形报告





对于不需要线存在的场计算，仍然要使用一条线来激活计算器中输出的场量。如果没有线，“Traces”窗口中将不会出现“Calculator Expressions”这一项，即使场计算器的结果与坐标位置无关（如对一个体的积分结果）。

### 5.5.3 注意事项

要想得到更高精度的计算结果，可以在计算空间或准备进行积分等运算的区域通过手动方法细化网格。

当采用 Fast sweep 时，离开 Solution Frequency 越远，计算精度越低。推荐选择在偏离求解频率±20%以内进行计算。

(1) HFSS 中场的输出采用的是 MKS 单位；

(2) 场计算器中的原始场数据与 HFSS 工程中的激励源相关，在使用场计算器之前将激励源设置（Edit Source）为所需的值；

(3) 本征模式 Eigen Solution 下的场数据采用归一化的数据；

(4) 三角函数中使用的默认单位是弧度。

## 5.6 辐射和散射问题的处理

与辐射和散射相关的仿真属于微波工程中的外问题，对应的有微波天线的设计、目标散射特性的计算，以及电磁兼容分析等工程问题。HFSS 软件为辐射和散射问题提供了一整套完整的分析计算和处理功能，用户可以方便地进行仿真分析计算和对结果进行后处理。

### 5.6.1 HFSS 辐射问题的计算

在仿真辐射问题时，建模操作时需要在距离模型物体至少 1/4 波长的位置设置辐射边界，用以截断有限元计算区域并模拟无限大辐射空间。

HFSS 在计算分析辐射问题时，首先求解辐射边界上的场解，辐射边界以外、周围空间上的解则由辐射结构表面上的场值来计算。该区域又可分为近场区和远场区两部分。对于近场区，指的是接近源的区域。一般情况下，封闭表面边界的外部电场  $E(x, y, z)$  由以下公式表示：

$$E(x, y, z) = \int_s ([j\omega\mu_0 H_{\tan}]G + [E_{\tan} \times \nabla G] + [E_{\text{normal}} \nabla G])ds \quad (5-6)$$

式中， $s$  表示辐射边界表面； $j$  表示虚单位  $\sqrt{-1}$ ； $\omega$  表示角频率  $2\pi f$ ； $\mu_0$  为自由空间磁导率； $H_{\tan}$  表示表面磁场的切向分量； $E_{\text{normal}}$  表示表面电场的法向分量； $E_{\tan}$  表示表面电场的切向分量； $G$  代表自由空间格林函数，可表示为

$$G = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}{|r-r'|} \quad (5-7)$$

式中， $k_0$  为自由空间波数； $r$  和  $r'$  代表场点和源点的位置矢量； $\epsilon_0$  为自由空间介电常数； $\epsilon_r$  是



介质的相对介电常数； $u_r$  是介质的相对磁导率。远场是与  $r$  有关的球面波，用公式表示为

$$E = \eta_0 H \times \hat{r} \quad (5-8)$$

式中， $\eta_0$  代表自由空间波阻抗。

当计算近场时，必须指定计算半径  $r$ ，利用公式（5-6）可以计算辐射结构的任意指定半径位置的场；当计算远场时，公式（5-6）中的格林函数可近似表示为

$$G \approx \frac{e^{-jk_0 r} e^{jk_0 \hat{r} \cdot \mathbf{r}'}}{r} \quad (5-9)$$

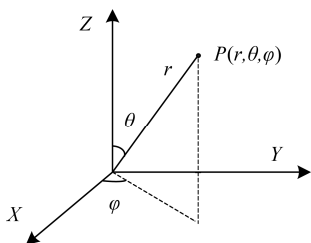


图 5-28 球坐标系

并仅对位于远场区域的场点有效。

在实际使用时，一般假定辐射体表面为球面，并采用球坐标系来处理辐射问题。对于空间中的任意一点  $P(x, y, z)$ ，其在球坐标系中可以表示为  $P(r, \theta, \phi)$ ，如图 5-28 所示。

在计算近场和远场时，需要指定  $\theta, \phi$  的范围和步长，以明确计算的辐射场球面的范围和方向，这部分内容包含在定义远、近场辐射球面的设置中。

## 5.6.2 天线远场方向图的绘制

本节以绘制天线远场方向图为例介绍 HFSS 后处理时，如何查看模型的辐射特性。

### 1. 定义远场辐射球面

由 5.6.1 节中介绍的计算原理可知，HFSS 为了计算远区辐射场，必须事先建立一个远场辐射球面包围辐射体，以计算穿过该球面的远场数据。远场辐射球面的定义步骤如下所示。

（1）单击“HFSS→Radiation→Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”，弹出“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框，或者在工程管理树中选择“Radiation”节点，打开右键的快捷菜单，选择其中的“Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令来打开设置对话框，如图 5-29 所示。

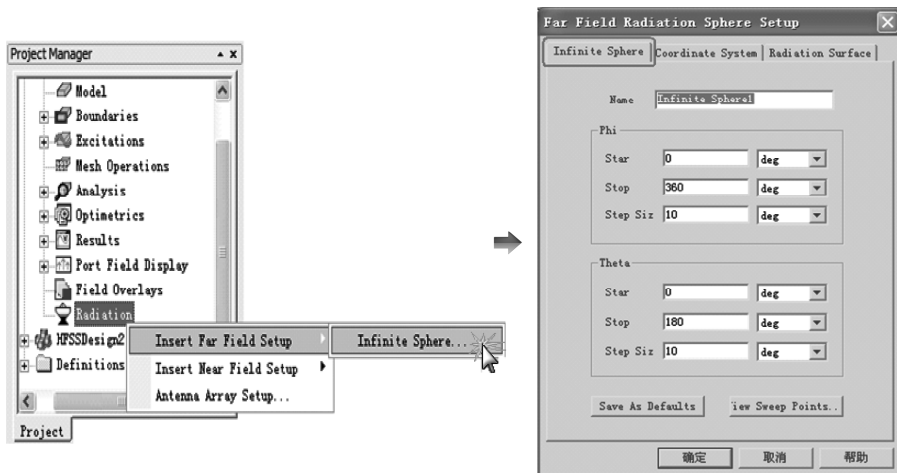


图 5-29 打开“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框

(2) 在“Far Field Radiation Sphere Setup (远场辐射球面设置)”对话框的“Infinite Sphere”选项卡中,在“Name”文本框中输入新建辐射球面的名称,以便绘制远场方向图时选择相应的远场辐射球面,其默认名为 Infinite Spheren,  $n$  为 1、2、3...的数字编号。

(3) 按照图 5-28 所示的球坐标系指定辐射球面的计算角度范围,包括角度  $\theta$  和角度  $\varphi$  的起始角度和终止角度及角度步长,设置时角度范围必须在  $-360^\circ \sim 360^\circ$  之间,而单位既可取角度,也可以取弧度。HFSS 默认的单位为角度。

(4) 在“Coordinate System (坐标系)”选项卡中,指定辐射球的方向坐标系,既可以是全局坐标系,也可以选择用户已经创建的局部坐标系。

(5) 在“Radiation Surface (辐射表面)”选项卡中,指定辐射表面或 PML 边界面。

(6) 单击“确定”按钮完成设置。

经过以上步骤,就完成了远场辐射球面的定义。新建的远场辐射球面将自动添加到工程管理窗口中的“Radiation”节点下(如图 5-28 所示),用户可以双击相应的辐射球面名称打开“远场辐射球面设置”对话框进行查看和修改,也可以通过以上步骤定义多个不同的辐射球面,以满足不同的后处理需求。



#### 特别说明

HFSS 进行辐射场后处理时,至少需要沿两个方向划分场。因此,如果角度  $\theta$  的步长为零,则角度  $\varphi$  的步长必须大于零,反之亦然。

## 2. 查看远场辐射特性的步骤

创建完远场辐射球面以后,就可以查看关心的远场辐射结果了。创建远场辐射结果报告的一般方法和步骤如下所示。

(1) 选定工程管理窗口中的“Results”节点,单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report”或在 HFSS 菜单对应的下拉菜单中选择“Results→Create Far Fields Report”并在其后的子菜单中选择远场报告显示方式命令。命令执行后会弹出如图 5-30 所示的新的“Report”对话框。



图 5-30 “Report”对话框

远场辐射结果的显示方式主要有以下几种。

- ① Rectangular Plot: 直角坐标图。
- ② Radiation Pattern: 辐射方向图。
- ③ Data Table: 数据列表。
- ④ 3D Rectangular Plot: 三维直角坐标图。
- ⑤ 3D Polar Plot: 三维球形坐标图。

(2) 在“Report”对话框的“Context”栏中选择查看的求解对象(Solution 项)及用来计算远场辐射的球面(Geometry 项)。

(3) 在“Category”栏中选择要查看的远场参数类型;在“Quantity”栏中选择具体的远场参数形式;在“Function”栏中选择远场参数操作函数。其中“Category”栏中的参数类型包括以下几项。

- ① Variables: 固有参数,如频率、角度 $\theta$ 和 $\varphi$ ,或用户自己定义的参数。
- ② Output Variables: 用户自己定义的输出变量。
- ③ rE: 辐射电场。
- ④ Gain: 增益。
- ⑤ Directivity: 天线方向性系数。
- ⑥ Realized Gain: 天线实际增益。
- ⑦ Axial Ratio: 轴比。
- ⑧ Polarization Ratio: 圆极化率。
- ⑨ Antenna Params: 天线参数,包含 5.6.1 节介绍的各种天线指标。

“Quantity”栏中给出了 HFSS 计算天线参数时,参数的远场数据形式,有以下几种。

- ① Total: 总量。
- ② Phi:  $\varphi$  方向分量。
- ③ Theta:  $\theta$  方向分量。
- ④ X: X 方向分量。
- ⑤ Y: Y 方向分量。
- ⑥ Z: Z 方向分量。
- ⑦ LHCP: 左旋圆极化分量。
- ⑧ RHCP: 右旋圆极化分量。
- ⑨ CircularLHCP: 左旋圆极化天线极化率。
- ⑩ CircularRHCP: 右旋圆极化天线极化率。
- ⑪ SphericalPhi: 方向极化天线极化率。
- ⑫ SphericalTheta: 方向极化天线极化率。
- ⑬ L3X: Ludwig 定义下 X 方向上的分量。
- ⑭ L3Y: Ludwig 定义下 Y 方向上的分量。

“Function”栏中的数学函数表达式含义如表 3-2 所示,这里不再赘述。

(4) 切换到“Families”选项卡,指定频率、变量等参数。

(5) 单击“New Report”按钮绘制图形结果,单击“Close”按钮关闭设置对话框。

以上是查看远场辐射特性的一般步骤，下面简单介绍一下绘制三维和二维天线远场增益方向图的过程，以加深读者对辐射问题后处理的理解。

### 3. 天线远场 3D（立体）增益方向图的绘制

打开入门实例二中的对称偶极子天线仿真实例，首先执行生成远场报告命令，同时选择报告显示方式为 3D 极坐标，如图 5-31 所示。

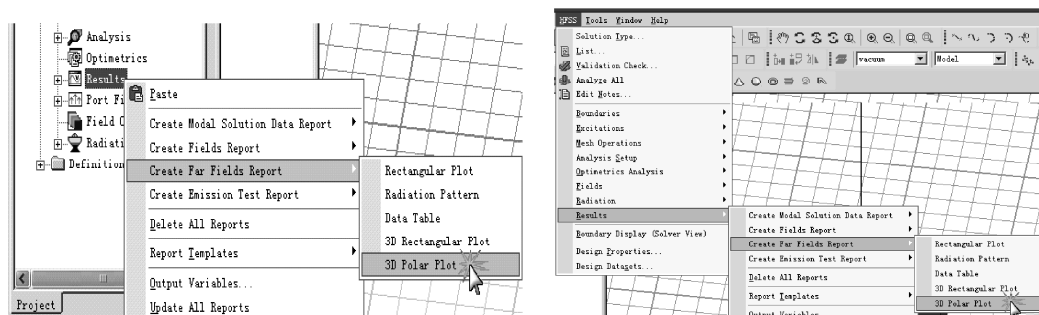


图 5-31 执行命令

打开“Report”对话框，在“Category”栏中选择参数类型为增益 Gain；在“Quantity”栏中选择总增益 GainTotal；在“Function”栏中选择 dB；由于我们要查看整个完整的立体方向图，所以 phi 和 Theta 采用默认的全部角度 All，如图 5-32 所示。

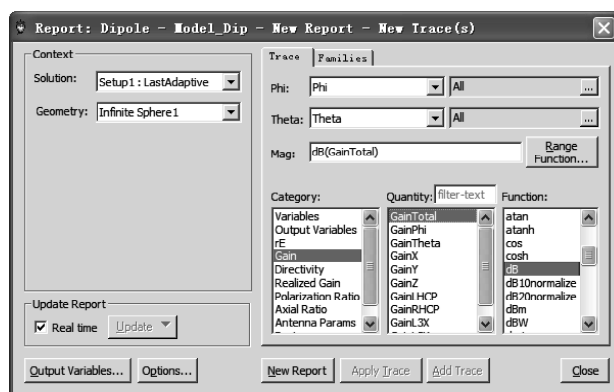


图 5-32 “Report”对话框

设置完成后，单击“New Report”按钮，生成如图 5-33 所示的天线远场 3D 增益方向图，然后单击“Close”按钮关闭设置对话框。新绘制的天线远场 3D 增益方向图的名称会自动

添加到工程管理树的“Results”节点下（如图 5-33 所示），用户可以双击对应的报告名称进行查看和修改。

### 4. 天线二维增益方向图的绘制

除了 3D 增益方向图外，有时还需要查看天线在某一个平面上的增益方向图以了解天线更详细的指标特性。天线二维增益方向图的绘制步骤如下所示。

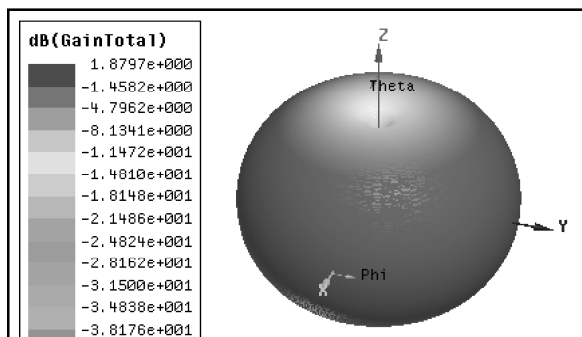
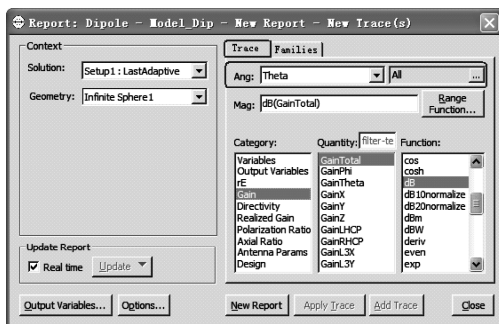


图 5-33 天线远场 3D 增益方向图

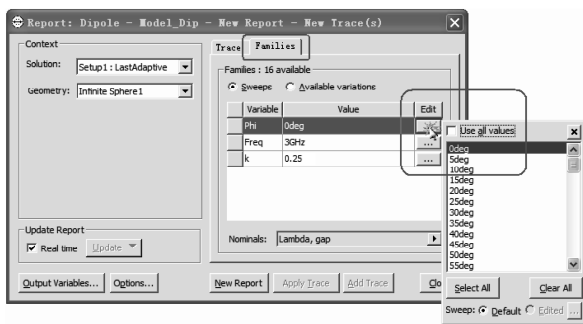
(1) 在工程管理树中的“Results”节点处打开右键菜单，选择“Results→Create Far Fields Report”并在其后的子菜单中选择方向图显示方式为“Radiation Pattern”（辐射方向图）。

(2) 在“Category”栏中选择参数类型为增益 Gain；在“Quantity”栏中选择总增益 GainTotal；在“Function”栏中选择 dB。以查看 xoz 平面为例，由球坐标系可知此平面为  $\Phi=0$  的平面，因此保持扫描角 Theta 的范围不变，如图 5-34（a）所示。

(3) 切换至“Families”选项卡，单击“Phi”项后面的...按钮，取消对“Use All Values”项的点选，并在 Phi 扫描数值栏中选择 0deg。同理，设置参数 k 的数值为 0.25，如图 5-34（b）所示。



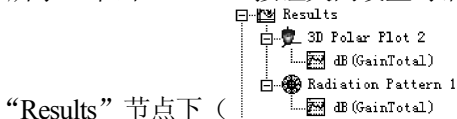
(a) “Trace”选项卡



(b) “Families”选项卡

图 5-34 二维方向图设置窗口

(4) 设置完成后，单击“New Report”按钮生成 xoz 平面的二维远场增益方向图，如图 5-35 所示。单击“Close”按钮关闭设置对话框，新创建的方向图的名称会自动添加到工程管理树中的



“Results”节点下（Results > 3D Polar Plot 2 > dB(GainTotal) > Radiation Pattern 1 > dB(GainTotal)），用户可以单击报告名称进行查看和修改。

(5) 为增益方向图添加标注点。绘制完方向图后，为了查看增益方向图的具体数值，可以为图形添加标注点。在模型显示窗口单击鼠标右键，选择“Marker→Add Marker”命令，命令执行后进入标准点选择状态，在方向图曲线上会出现一个可随鼠标移动的小滑块，移动鼠标到想要添加标注的位置，单击鼠标左键，便添加了一个标注点，此时在图形的左上方会显示该点的具体参数值。重复以上步骤可添加多个标准点，如果需要调整标准点的位置，可

以用鼠标单击某一标注点显示所在的表格内容, 然后利用键盘的左、右方向键进行调整, 直至标注点到达所需位置时, 再在空白处单击鼠标左键确认。具体步骤如图 5-36 所示。

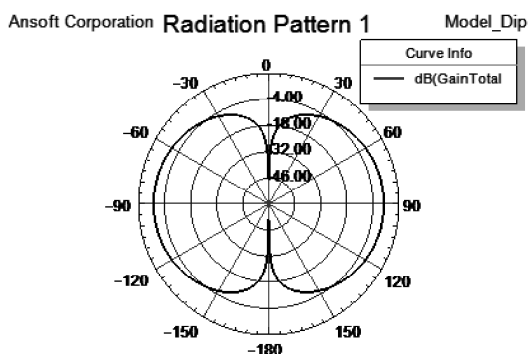
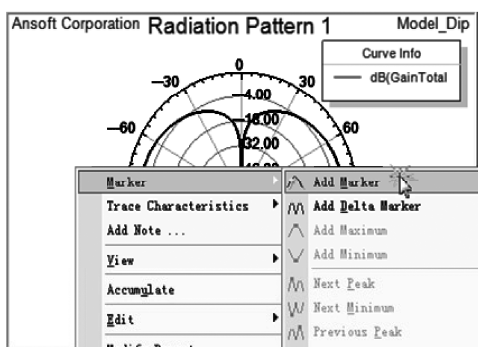
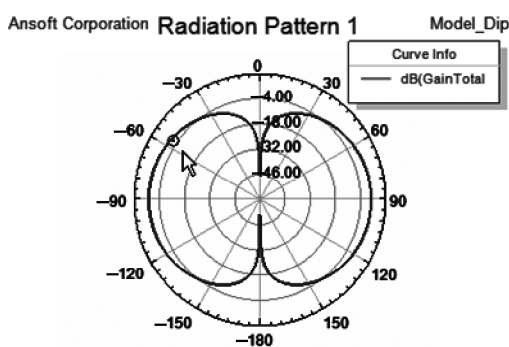


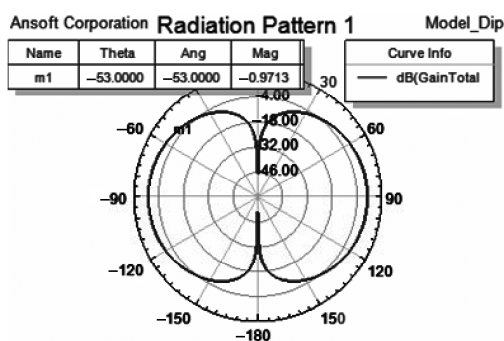
图 5-35 xoz 平面的远场增益方向图



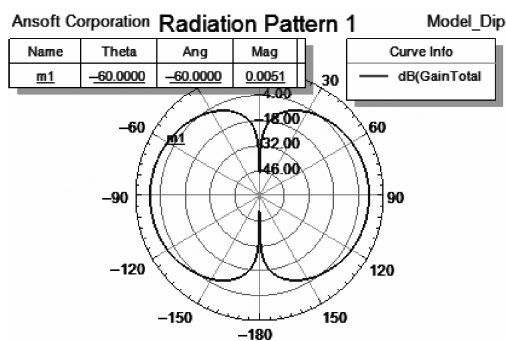
(a) 执行添加标注命令



(b) 标注点选择状态



(c) 单击生成查看标注点 m1



(d) 单击 m1 激活标注点进行调节

图 5-36 图形标注点的添加、查看与调整



在添加标注点过程中随时可以按 Esc 键退出添加状态。在标注点被激活的状态下, 显示列表中的相关内容下方会出现下划线, 提醒用户可以对标注点进行调整。



## 5.6.3 天线参数的计算与查看

### 1. 天线参数的计算

HFSS11.0 版本提供了天线参数的直接计算功能, 允许以列表的形式集中显示与天线相关的各项参数的功能, 包括 Max U (最大辐射强度)、Peak Directivity (最大方向性系数)、Peak Gain (最大增益)、Peak Realized Gain (最大实际增益)、Radiated Power (辐射功率)、Acceptable Power (净输入功率)、Incident Power (输入功率)、Radiation Efficiency (辐射效率)、Front to back Ration (前后比)、轴比 (Axial Ratio)、极化率 (Polaritation Ratio)。各项参数的含义如下。

#### 1) 最大辐射强度

辐射强度  $U$  代表的是从天线单位立体角辐射出去的功率, 其单位为 W/Sr (瓦/立体角弧度)。HFSS 计算的是最大辐射方向上的辐射强度, 用公式表示为

$$U(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{\eta_0} r^2 \quad (5-10)$$

式中,  $U(\theta, \varphi)$  为辐射强度的最大值;  $|E|$  为电场的幅度;  $\eta_0$  为自由空间波阻抗;  $r$  为场点距离天线的距离, 单位为 m (米)。

#### 2) 最大方向性系数

方向性系数用来表征天线辐射能量集中的程度, 其定义为: 在相同的辐射功率下, 天线在空间某一点产生的电场强度的平方与理想无方向性点源天线在同一点产生的电场强度平方的比值。它也可以表示成天线在空间某点的辐射功率密度与该天线的平均辐射功率之比, 表示为

$$\text{Directivity} = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} r^2 \quad (5-11)$$

式中,  $U$  为辐射强度;  $P_{\text{rad}}$  为辐射功率。最大方向性系数时,  $U = U_{\text{max}}$ 。

#### 3) 最大增益

最大增益指在相同净输入功率时, 天线在最大辐射方向上的辐射功率密度与无方向性天线在同一位置上的功率密度的比值。它可表示为天线的辐射强度与天线得到的总功率之比的  $4\pi$  倍:

$$\text{Gain} = \frac{4\pi U}{P_{\text{acc}}} \quad (5-12)$$

式中,  $U$  为辐射强度;  $P_{\text{acc}}$  为天线获得的净输入功率。

天线的增益与方向性密切相关, 也容易混淆, 不考虑天线自身的损耗, 则天线的增益和方向系数完全相同; 对于有耗天线, 两者则有如下关系:  $G = \eta D$ , 其中  $\eta$  为天线的效率。

#### 4) 最大实际增益

最大实际增益指在相同输入功率时, 天线在最大辐射方向上的辐射功率密度与无方向性天线在同一位置上的功率密度的比值。它可表示为天线的辐射强度与天线端口上总的输入功率之比的  $4\pi$  倍:





$$\text{realizedGain} = \frac{4\pi U}{P_{\text{inc}}} \quad (5-13)$$

式中,  $P_{\text{inc}}$  为输入功率, 单位为 W。

#### 5) 辐射功率

辐射功率是天线穿过辐射边界辐射到自由空间的电磁能量。对于 HFSS 中的辐射问题, 辐射功率可以表示为

$$P_{\text{irad}} = \oint_s \frac{1}{2} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \hat{n} ds \quad (5-14)$$

式中,  $\vec{E}$  是电场强度;  $\vec{H}^*$  是磁场强度的共轭;  $\hat{n}$  是闭合边界曲面的外法线单位矢量。

#### 6) 净输入功率

净输入功率指输入功率中实际进入天线端口的那部分功率。对于只有一个传播模式的单个无耗简单天线情况而言, 净输入功率可以表示为

$$P_{\text{acc}} = P_{\text{inc}} (1 - |S_{11}|^2) \quad (5-15)$$

对于多端口输入的 HFSS 辐射结构来说, 天线的净输入功率可以表示为

$$P_{\text{acc}} = \text{Re} \int_B (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{s} \quad (5-16)$$

式中,  $\vec{E}$  为电场强度;  $\vec{H}^*$  是磁场强度的共轭;  $B$  为辐射体所有输入端口边界的总和;  $d\vec{s}$  为微分项, 方向指向模型内部。

#### 7) 输入功率

对于 HFSS 来说, 输入功率是指定义在端口的激励功率, 其默认值为 1W。它可以在“Edit Sources”对话框中进行设置。

#### 8) 辐射效率

天线的辐射效率是指天线的辐射功率与净入射功率的比值:

$$e = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{acc}}} \quad (5-17)$$

#### 9) 前后比

天线的前后比指的是天线方向图中前后瓣的最大比值。

除了以上天线参数外, HFSS 还在后处理中提供了天线的其他参数的计算, 如天线的轴比和极化率的计算。对于电场的极化, HFSS 支持三种不同坐标系下的极化描述, 分别为 Spherical Polar 坐标系、Ludwig3 坐标系和 Circular 坐标系, 电场在这三种坐标系下分别表示为  $E = (E_\theta, E_\varphi)$ ;  $E = (E_x, E_y)$ ;  $E = (E_R, E_L)$ , 并满足以下关系:

$$\begin{cases} E_x = E_\theta \cos \varphi - E_\varphi \sin \varphi \\ E_y = E_\theta \sin \varphi + E_\varphi \cos \varphi \end{cases}, \begin{cases} E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta + jE_\varphi) \\ E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta - jE_\varphi) \end{cases} \quad (5-18)$$

#### 10) 轴比

轴比指的是天线椭圆极化的长轴与短轴之比。轴比最小为 1, 表示电场是圆极化的; 最

大为无穷大，代表电场是线极化的。

### 11) 极化率

天线的极化率指的是在空间某一点，场矢量在两个指定的正交极化方向上复振幅的比值。极化率在不同的参考坐标下有不同的表达式，在前面提到的三种坐标参考下的表达式分别为

$$\begin{cases} \text{Spherical Polar / Phi} = \left| \frac{E_\phi}{E_\theta} \right| \\ \text{Spherical Polar / Theta} = \left| \frac{E_\theta}{E_\phi} \right| \end{cases} \quad (5-19)$$

$$\begin{cases} \text{Ludwig3 / X} = \left| \frac{E_x}{E_y} \right| \\ \text{Ludwig3 / Y} = \left| \frac{E_y}{E_x} \right| \end{cases} \quad (5-20)$$

$$\begin{cases} \text{Circular / LHCP} = \left| \frac{E_L}{E_R} \right| \\ \text{Circular / RHCP} = \left| \frac{E_R}{E_L} \right| \end{cases} \quad (5-21)$$

## 2. 天线参数的查看

在 HFSS 的后处理中查看天线参数和最大场强数据方法的步骤为

(1) 如前面提到的那样，首先定义远场辐射球面；

(2) 在工程管理窗口的“Radiation”节点中找到定义的远场辐射球面的名称，选中并打开鼠标右键的快捷菜单，选择菜单中的“Compute Antenna Parameters...”命令，命令执行后会弹出如图 5-37 所示的“Antenna Parameters (天线参数)”对话框。

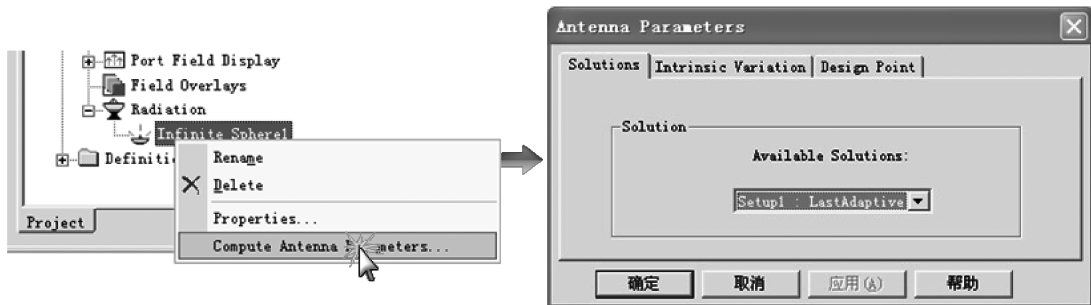


图 5-37 “Antenna Parameters (天线参数)”对话框

(3) 在“Antenna Parameters (天线参数)”对话框中的“Solutions”选项卡里设置天线参数计算的求解项；切换到“Intrinsic Variation”选项卡，选择天线参数的计算频率，然后单击“确定”按钮完成设置，会得到如图 5-38 所示的天线参数计算结果及最大远场数据。

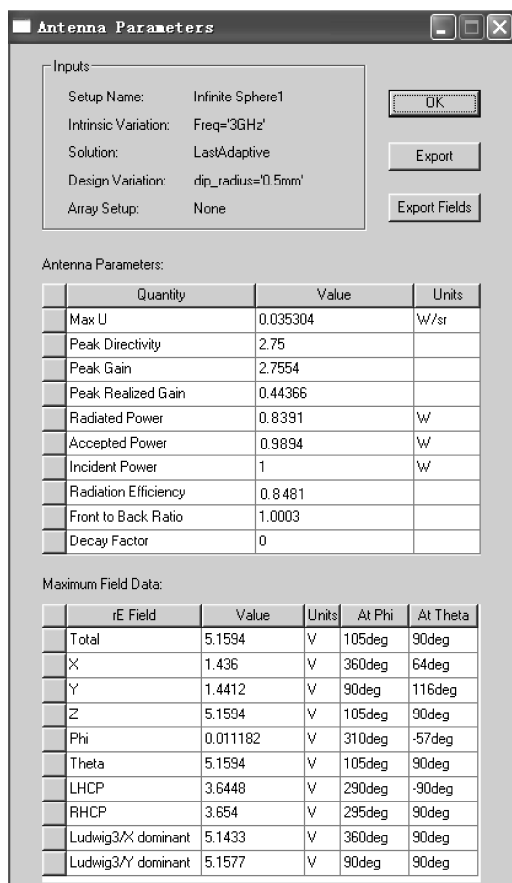


图 5-38 天线参数计算结果及最大远场数据

## 5.6.4 天线阵列的处理

### 1. 阵因子的计算

HFSS 可以计算生成阵列天线辐射方向图及在已分析单个阵元的基础上计算天线阵参数，可以定义阵列几何结构和激励方式。HFSS 首先仿真单个阵元，然后通过“阵因子”来计算生成阵列天线辐射方向图。假设阵列由  $N$  个天线单元组成，则天线阵的方向函数  $D_{\text{array}}(\theta, \varphi)$  可以表示成单元天线的方向函数  $f_{\text{element}}(\theta, \varphi)$  和阵因子  $F(\theta, \varphi)$  的乘积：

$$D_{\text{array}}(\theta, \varphi) = |F(\theta, \varphi)| f_{\text{element}}(\theta, \varphi) \quad (5-22)$$

式中，阵因子  $F(\theta, \varphi)$  是阵中各阵元的位置、激励幅度和相位的函数，定义为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N C_n e^{jp_n + jk_0 \hat{r} \cdot \mathbf{r}_n} \quad (5-23)$$

式中， $\mathbf{r}_n$  为第  $n$  个阵元的位置矢量； $C_n$  为相对振幅； $p_n$  为相对相位。

HFSS 支持两种类型的几何阵列。一种是“规则均匀阵列”，它定义为二维均匀分布的有限等副单元阵列。规则均匀阵列形式可由使用者按指定方向排布。天线阵列的扫描方向可

依据球坐标定义。规则均匀阵列也允许使用阵元之间的相位差来设定扫描角。另一种是自定义阵列，“自定义阵列（custom array）”允许更大的灵活性，可以用阵元构造分布于三维空间的任意阵列，且可以给各个阵元赋予复数权值。

## 2. 规则排列的均匀天线阵列

规则排列的均匀天线阵列定义为同一平面上等间距排列的等幅单元阵列，阵元之间的相位变化可以由用户通过扫描角或相位差来设定。首先，在完成计算的天线单元仿真设计中，用鼠标右键打开工程管理窗口中的“Radiation”节点，在对应的快捷菜单中选择“Antenna Array Setup...”命令，命令执行后弹出“Antenna Array Setup（天线阵列设置）”对话框，在“Array Type”选项卡中勾选“Regular Array Setup”复选框，如图 5-39 所示。

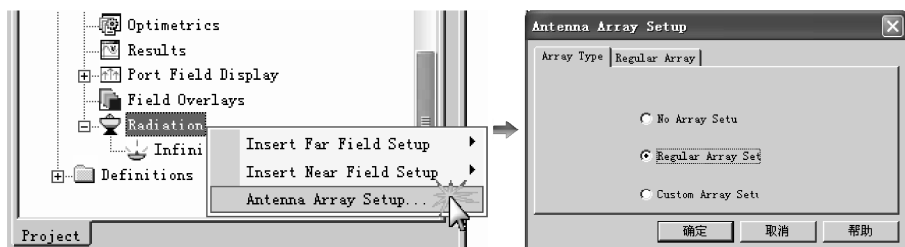


图 5-39 打开“天线阵列设置”对话框

然后切换至“Regular Array”选项卡，进入规则排列的均匀天线阵列设置界面，如图 5-40 所示。

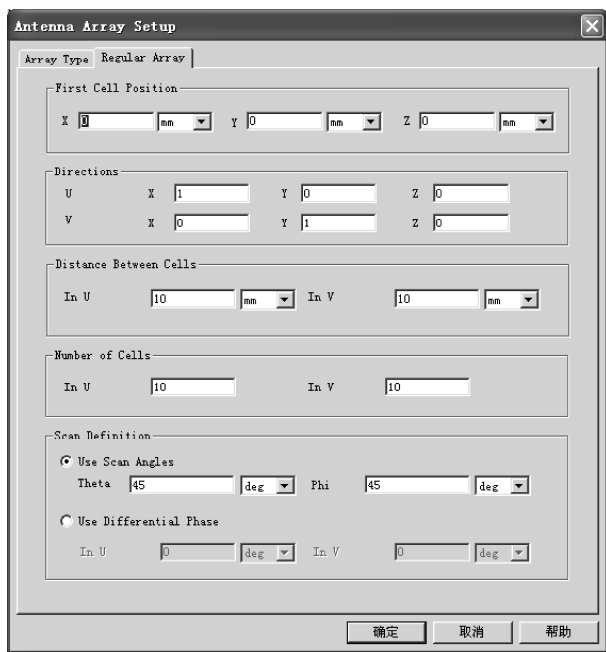


图 5-40 规则排列的均匀天线阵列设置界面

(1) First Cell Position: 用来输入天线阵列第一个阵元的坐标位置，目的是为整个天线



阵提供一个坐标位置基准。

(2) **Directions:** HFSS 中的天线阵元排列是以 U 轴和 V 轴为坐标系进行计算的, 此栏用来设置阵元排列方向与 x 轴和 y 轴的关系。图 5-40 中的设置代表 U 轴与 x 轴的正方向重合, V 轴与 y 轴的正方向重合。

(3) **Distance Between Cells:** 用来定义天线阵元在 U 轴方向和 V 轴方向排列时的距离。

(4) **Number of Cells:** 用来定义天线阵元沿 U 轴和 V 轴的分布数量。

(5) **Scan Definition:** 用来指定天线阵元的扫描角度或阵元间的相位差。如果选择使用扫描角度, 需要输入以  $(\theta, \varphi)$  为标准的天线阵列扫描角度数值; 如果选择使用相位差, 则选择 “Use Differential Phase” 选项, 然后在 “In U” 栏和 “In V” 栏中分别输入阵元沿这两个方向上的相位差值。

单击 “确定” 按钮完成规则排列的均匀天线阵列设置。图 5-40 中所设数值代表了一个  $10 \times 10$  的二维平面阵列, 阵元沿 x 轴和 y 轴均匀排列, 间距分别为 10mm 和 10mm。每个轴向上分布 10 个天线单元, 整个天线阵列的阵元等幅馈电, 赋予使阵列向上半空间  $(45^\circ, 45^\circ)$  方向扫描所具有的相位关系。以此类推, 用户可以配置自己需要的二维规则排列的均匀天线阵列。

设置完成后, 便可以查看对应天线阵列的各项辐射特性了。

### 3. 自定义天线阵列

HFSS 支持用户自定义天线阵列。用户可以自己使用文本文件定义天线阵列的位置、激励及相位信息, 然后导入软件中, HFSS 会根据用户提供的阵列信息计算天线阵因子, 利用方向图乘法原理计算天线阵的辐射特性。HFSS 可识别的自定义阵列文本文件格式为

```

N
x_1 y_1 z_1 C_1 P_1
x_2 y_2 z_2 C_2 P_2
:
x_N y_N z_N C_N P_N

```

其中,  $N$  为天线阵元数量;  $x_n, y_n, z_n$  代表的是天线阵列第  $n$  个阵元位置的  $x, y, z$  坐标, 不需要标注数值单位, 默认采用当前设计指定的长度单位;  $C_N$  表示天线阵列第  $N$  个阵元的复振幅;  $P_N$  表示天线阵列第  $N$  个阵元的相位值。

举例说明自定义阵列的用法: 首先定义一个  $2 \times 3$  的平面阵列, 天线阵元位于 xy 平面上, x 轴向间距为 0.6 个长度单位; y 轴向间距 0.8 个长度单位, 天线阵等幅、等相位馈电, 则自定义文本文件中的信息内容为

```

6
0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
0.6 0.0 0.0 1.0 0.0
0.0 0.8 0.0 1.0 0.0
0.6 0.8 0.0 1.0 0.0
0.0 1.6 0.0 1.0 0.0
0.6 1.6 0.0 1.0 0.0

```

输入完成后将文件保存为 Array.txt 文本文件 (txt)。下面开始将其导入 HFSS 中。首先在完成计算的天线单元仿真设计中，用鼠标右键打开工程管理窗口中的“Radiation”节点，在对应的右键快捷菜单中选择“Antenna Array Setup...”命令，命令执行后会弹出如图 5-41 所示的“Antenna Array Setup (天线阵列设置)”对话框。

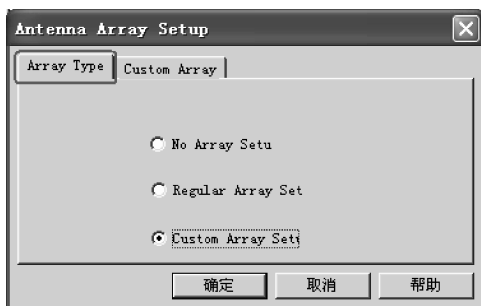


图 5-41 “Antenna Array Setup (天线阵列设置)”对话框

在“Array Type”选项卡中勾选“Custom Array Setup”复选框；然后切换到“Custom Array”选项卡，单击“Import definition”按钮，在弹出的“打开”对话框中找到并导入编辑好的 Array.txt 文本文件，如图 5-42 所示。



图 5-42 “Custom Array”选项卡

文件导入后，切换到“Custom Array”选项卡中，其中“View Definition”按钮将被激活，用户可以单击此按钮查看并核对天线阵列信息，如图 5-43 所示。

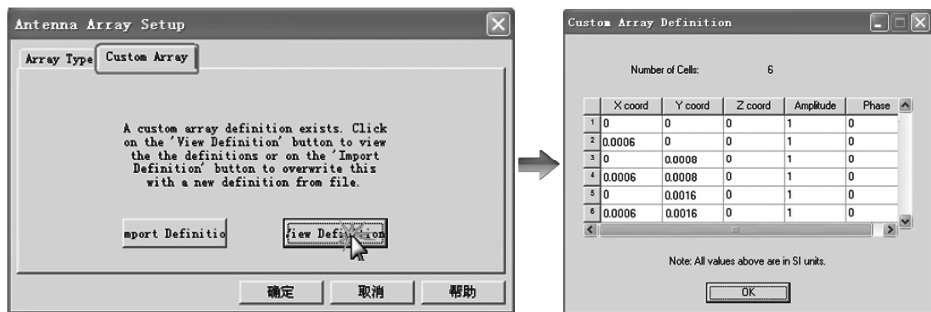


图 5-43 查看自定义阵列信息

阵列信息导入完成后,在当前的 HFSS 设计中进行后处理,查看远场辐射特性时,将自动显示为天线阵列的辐射特性。要想查看单元特性,只需在“Array Type”选项卡中选择“No Array Setup”项即可。



由于 HFSS 计算天线阵因子时,用到的只是阵元之间的相对位置关系,所以用户在进行自定义天线阵列文本的编辑时,只要保证格式和阵元的相对位置关系正确即可,至于天线阵元的绝对位置并不重要,即编辑内容并不唯一,如举例中的 2×3 的平面阵列是将第一个天线单元放在(0,0,0)坐标位置,还是将天线阵列中心单元放在(0,0,0)坐标位置,对于 HFSS 计算结果来说并无任何区别。

### 5.6.5 HFSS 散射问题的计算

微波散射问题可以看成目标在微波照射下的二次辐射问题,即目标在微波照射下产生感应电流,感应电流在空间辐射产生散射场。因此,对于散射问题的计算,首先要求出目标在微波照射下的感应电流。感应电流与入射电磁场相互作用,会引起空间电磁场分布的改变。描述这一过程的三个重要电磁场量是:入射场,一般为平面波,天线的远区场可以近似为平面波;总场,是物理上可测量的场,它是目标与入射场相互作用形成的空间电磁场分布;散射场,它是从总场中减去入射场后剩下的场,是由目标的散射特性引起的,因此叫做散射场。散射问题最重要的一个应用是研究目标在雷达照射下的散射特性,这一特性可以描述为目标在平面波照射下的雷达散射截面,即 RCS,可按下面的公式计算:

$$RCS = \frac{4\pi r^2 |E_{scat}|^2}{|E_{inc}|^2}$$

式中,  $E_{scat}$  表示散射场;  $E_{inc}$  表示入射场。

按照入射波和观察角度的不同, RCS 一般分为单站 RCS (mono-static RCS) 和双站 RCS (bi-static RCS)。

当散射目标被某一方向上的入射波 (HFSS 不支持其他形式的激励) 激励照射时,如果观察的是返回入射波方向的回波,则称为单站 RCS,即观察角度与入射角度是同一方向,也称为后向散射,如图 5-44 (a) 所示。在 HFSS 中,查看单站 RCS 时,用户不需要关注所设远场辐射球面中 Theta 和 Phi 的具体数值。单站 RCS 的结果只受入射波的入射方向中的 Theta 和 Phi 的影响。

而当散射目标被某一方向上的入射波激励照射时,研究的是另外一个与入射波方向不同的观察角度上的回波情况,称为双站 RCS,即观察角度与入射角度不在同一个方向上,如图 5-44 (b) 所示。查看双站 RCS 时需要指定观察角度的 Theta 和 Phi 的数值。

在 HFSS 软件中,和天线辐射问题的计算一样,作为外问题的散射问题的计算也需要截断边界条件,如辐射边界或 PML。辐射边界和 PML 不仅作为截断边界条件,同时也是计算远场的积分面。对于辐射边界,软件的默认边界就是积分表面;对于 PML,软件的默认空

气区域和 PML 之间的表面是积分表面。

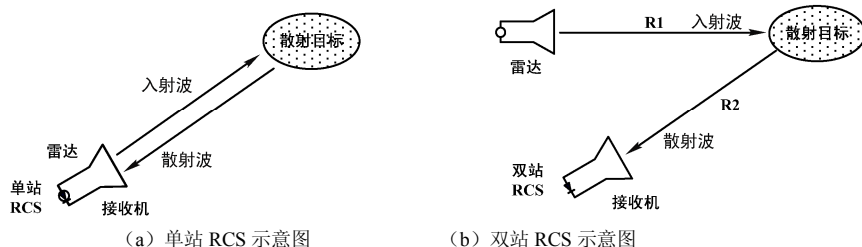


图 5-44 雷达 RCS 的定义

HFSS 软件中为散射问题的分析提供了多种入射波类型，但是对于 RCS 的求解，只能使用平面波入射激励。在 HFSS 软件中，入射波激励的位置选择在辐射边界或 PML 的一些面上，其他边界默认为只是辐射边界，可以设置入射平面波的极化和入射方向等参数。对于散射问题的后处理，HFSS 提供了与辐射问题一样的方法和途径，用户只需要在创建远场报告时在参数类型栏中选取所需的散射参数即可。HFSS 后处理中的散射参数类型如图 5-45 所示。

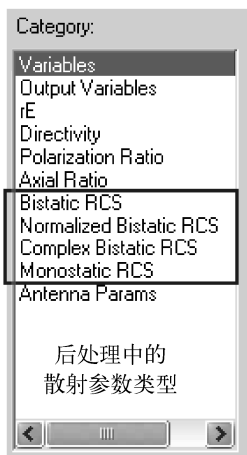


图 5-45 HFSS 后处理中的散射参数类型



## 第6章 HFSS 优化设计

当我们要考虑不同结构参数变量对模型性能的影响及需要综合优化模型性能时，就需要用到 HFSS 的 Optimetrics 功能模块。Optimetrics 是集成在 HFSS 中的优化设计模块，该模块自动分析参数的变化对求解结果的影响，其提供的分析功能包括参数扫描分析（Parametric）、优化设计（Optimization）、调谐分析（Tuning）、灵敏度分析（Sensitivity）和统计分析（Statistical）等。本章将结合波导不等功分器优化设计实例来介绍参数扫描分析和参数优化的使用。通过本章的学习，读者将学到以下相关知识点和内容：

- （1）如何使用参数扫描分析；
- （2）如何进行优化设置；
- （3）如何构造优化目标函数；
- （4）运行优化分析；
- （5）查看收敛情况；
- （6）如何使用最佳变量；
- （7）如何使用调谐分析；
- （8）如何使用灵敏度分析；
- （9）如何使用统计分析。

### 6.1 基本概念及功能介绍

优化设计是指 HFSS 软件利用 Optimetrics 模块在一定的约束条件下根据特定的优化算法对设计的某些参数变量进行筛选，从所有可能的优化变量中寻找一个满足设计要求的值。优化设计时，首先要明确设计要求或设计目标，然后根据设计要求创建初始结构模型、定义设计变量并构造目标函数，再指定优化算法进行优化，最后得到最佳的参数变量值。流程如下：

- （1）初始设计；
- （2）指定优化变量；
- （3）构造目标函数；
- （4）优化分析；
- （5）输出最佳结果。

#### 6.1.1 优化变量

优化变量指的是参与优化分析的工程或设计变量。如果在创建仿真模型时已经定义了相关参数变量，则在进行优化设计之前，还需要将其指定为优化变量，以便优化程序进行调用



计算。将工程或设计变量指定为优化变量的方法为：与添加相应变量的操作类似，首先打开添加工程或设计变量的“ProPerties”对话框，然后选择“Optimization”选项，切换至优化变量定义窗口，在参数变量列表中找到需要参加优化分析的变量，然后勾选变量对应的“Include”复选框，即将对应的变量指定为优化变量，并且可以设置变量后面相应的初始值、最小值和最大值，如图 6-1 所示。



图 6-1 设置优化变量

如果建模时没有设置参数变量，则可以参考 3.2 节中介绍的方法添加相应工程或设计变量，然后再按照以上方法将其指定为优化变量并设置初始值、最小值和最大值。对于优化变量最小值和最大值的选择，一般先通过进行参数扫描分析来确定其合理区间。

### 6.1.2 参数扫描分析

参数扫描分析（Parametric）定义一个或多个变量扫描计算，每个变量扫描定义了变量在一定范围内的取值。HFSS 将对所有变量取值的组合进行求解，给出对比结果，从而反映出不同参数变量的组合对模型仿真性能的影响。创建一个参数扫描分析的步骤如下。

（1）选择主菜单栏中的“HFSS→Optimetrics→Add Parametric...”命令，或者在工程树中选择“Optimetrics”节点，打开对应的右键快捷菜单，选择“Add→Parametric...”命令，打开“Setup Sweep Analysis（参数扫描分析）”对话框。

（2）单击对话框右上角的“Add...”按钮，弹出如图 6-2 所示的“Add/Edit Sweep（添加/编辑扫描变量）”对话框，添加扫描变量并设置变量的取值范围。具体操作为：在“Variable”栏的下拉菜单中选择参加扫描分析的变量名称，然后在“Variable”栏下选择变量取值方式及与取值方式对应的单点值、起始值、步进长度、总点数等相关参数，设置好后单击对话框中间的“Add...”按钮将扫描变量添加到右侧列表中，再单击“OK”按钮退出。

（3）添加完所有的扫描变量后，返回“参数扫描分析”对话框，如图 6-3 所示，在“Sweep Definition”选项卡中列出了所有的扫描变量，切换到“Table”选项卡，可以看到所有的变量组合，这些组合也是参数扫描分析时调用的参数。在“Options”选项卡中可以选择是否保存所有场解。

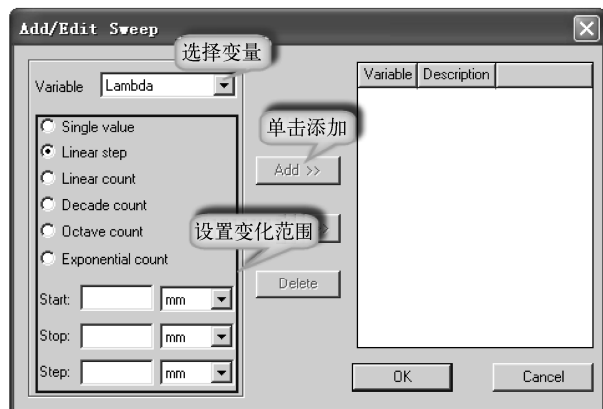


图 6-2 “Add/Edit Sweep (添加/编辑扫描变量)”对话框

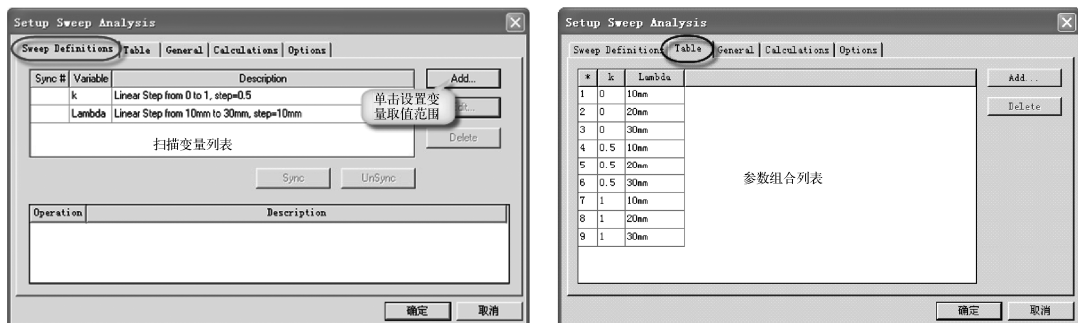


图 6-3 “Setup Sweep Analysis (参数扫描分析)”设置对话框

(4) 设置完成后, 单击“确定”按钮, 会在工程管理树的“Optimetrics”节点下自动添加一个参数扫描项, 其默认名称为 ParametricSetup1。用户可以双击它来查看和修改相应的设置。

(5) 在新建的参数扫描名称上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令, 进行参数扫描分析并查看分析结果。

参数扫描分析一般在正式参数优化之前进行, 因为它可以帮助使用者确定一个合理的变量优化区间。

### 6.1.3 参数优化设计

参数优化 (Optimization) 模块可以实现在一定的约束条件下, 根据特定的优化算法对某些设计变量进行调整, 从所有的变量组合中寻找一组以满足设计要求。要想添加一个参数优化, 用户首先需要添加或指定优化变量, 并设置优化变量的初始值、最小值和最大值。接下来在工程管理树的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Add → Optimization...”命令, 打开如图 6-4 所示的“Setup Optimization (优化设置)”对话框。

在“Setup Optimization (优化设置)”对话框中单击左下角的“Setup Calculations”按钮, 弹出如图 6-5 所示的“Add/Edit Calculation (添加/编辑算式)”对话框, 选择需要优化的参量, 即目标函数, 单击“Add Calculation”按钮完成添加。

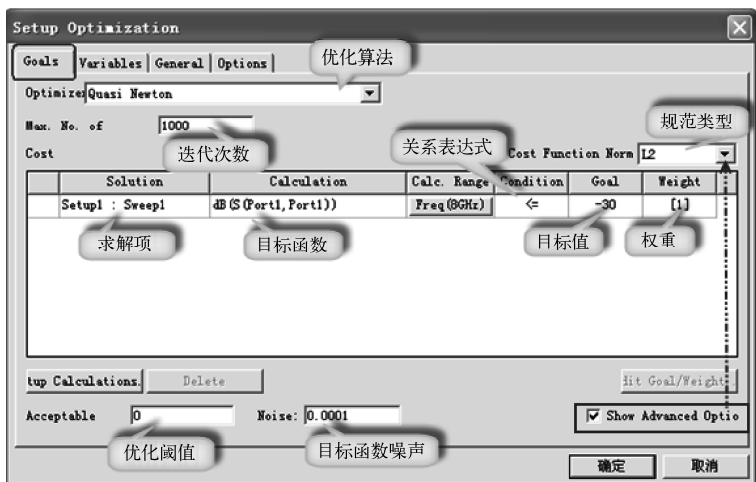


图 6-4 “Setup Optimization (优化设置)”对话框

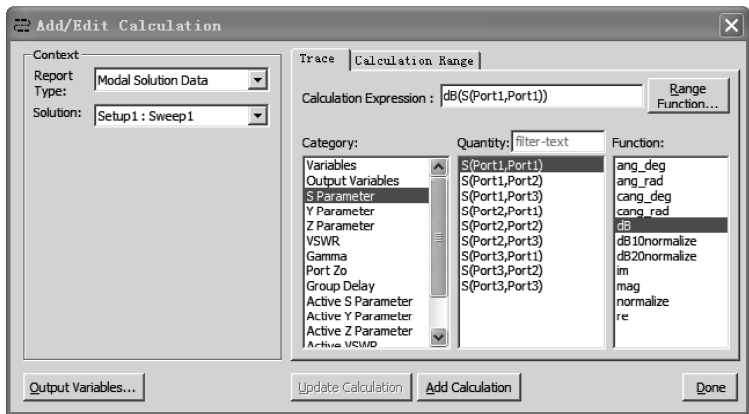


图 6-5 “Add/Edit Calculation (添加/编辑公式)”对话框

同时，编辑其他相应的设置项，各项的含义和设置方法如下。

## 1. 优化算法

HFSS 提供了 5 种优化算法，分别是拟牛顿法（QN）、模式搜索法（PS）、非线性顺序编程算法（SNLP）、混合整数非线性顺序编程算法（SMINLP）及遗传算法（GA）。各种优化算法的原理不在本书的介绍范围内，感兴趣的读者可以参考相关数学书籍了解算法的详细原理。HFSS 的使用者在选择优化算法时可以依据以下方法进行判断。

- （1）如果在求解过程中目标函数噪声是可以忽略的，可以使用拟牛顿优化方法。
- （2）如果目标函数噪声在工程中是显著的，则选择模式搜索法进行优化。
- （3）非线性顺序编程算法和拟牛顿法相似，适合解决目标函数的噪声较小的问题，具有更快的收敛速度和比拟牛顿法和模式搜索法更广的使用范围，适用于大多数 HFSS 优化问题。
- （4）混合整数非线性顺序编程算法能够解决具有连续变量和整数变量的问题，与非线性顺序编程算法相似，不同点是该算法需要标记出整数变量。



(5) 遗传算法是一类可用于复杂系统优化的具有鲁棒性的搜索算法, 其效率远高于传统随机算法, 是一种适用于各种问题的有效优化算法。

## 2. 迭代次数

迭代次数表示在优化过程中, 最多进行迭代的次数, 默认为 1000 次。

## 3. 求解项

求解项指定该优化分析是针对哪个求解设置进行的。

## 4. 目标函数

优化操作利用模型的结构变量来找到目标函数的最小值区域, 因此必须定义目标函数以便找到最小值点, 即最优化点。目标函数需要用户根据具体的优化设计目的进行构造, 既可以是单指标函数, 也可以是多指标的混合运算函数。例如, 需要优化端口 1 的驻波特性, 则可以选取目标函数为 dB (S (Port1, Port1)), 即  $S_{11}$  参数, 将优化条件设置为小于 -30 来进行优化。目标函数可以是任何 HFSS 的计算结果的组合, 如场量、S 参数或本征数据。在优化设置窗口中单击目标函数项可以打开其下拉菜单, 用户可以选择 “Edit...” 命令对目标函数进行编辑和修改。

## 5. 关系表达式

关系表达式代表的是目标函数和目标值的关系, 包括等于、小于等于、大于等于、最大和最小五种关系, 用户可以根据需要选择构造所需的优化目标。

## 6. 目标值

目标值用于指定目标函数的最终优化数值, 根据具体目标函数和优化要求进行设置。

## 7. 权重

在设置了多个目标函数的多优化目标的优化分析中, 有些性能指标是相互制约的, 从而导致难以使所有的指标都达到最优。为了保证使重要指标达到优化要求, 可以给每个目标函数加上一个权重, 代表该目标的重要性。权重值越大, 表示该目标越重要。设置权重值后, 优化误差变为各目标误差的加权和。优化运算时, 当加权误差小于等于设置的优化阈值时, 优化完成, 从而保证重要优化目标的实现。

## 8. 优化阈值

优化阈值是优化分析停止时目标函数的值, 作为优化过程终止的判别标准。目标函数的值必须等于或小于优化阈值。优化阈值可以为负值。

## 9. 目标函数噪声

电磁场数值计算因有限元网格的改变给目标函数引入了不同的噪声源, 因此必须给优化程序提供一个估计的噪声值, 以评估求解过程中有限元网格的变化对目标函数的影响, 即是否对目标函数有足够显著的影响。

例如, 如果目标函数为  $c = 10000 \cdot |S_{11}|^2$ , 其中  $|S_{11}|$  是反射系数的幅度。在最小值点,  $|S_{11}|$  可以认为接近 0, 即  $|S_{11}| \approx 0$ , 设在求解过程中  $|S_{11}|$  的误差为  $e_{S_{11}} \approx 0.01$ , 此时微扰的目标函数值为  $c_{\text{perturbed}} = 10000 \cdot (|S_{11}|_{\min} + e_{S_{11}})^2$ , 则在最小值附近, 目标函数的误差为  $e_c = c_{\text{perturbed}} -$





$c_{\min} = 10000 \times (0.0 + 0.01)^2 - (10000 \times 0.0) = 1.0$ ，由此得到目标函数的噪声为 1.0。

#### 6.1.4 调谐分析

调谐分析是指用户在手动改变设计变量的同时实时显示仿真分析结果。它在调谐一个变量时是有用的。例如，在执行了一个优化分析之后，在这个优化分析的优化程序里已经得到一个最佳的变量值，可以更细微地调整这个值来观察设计结果是怎样受到影响的（感性地获得某一变量对模型特性的影响），即手动改变设计变量，观察变量在最优值附近扰动对设计性能的影响。

对某一变量的调谐分析结束后，仿真分析结果将随之改变。如果在优化设计中选择了“Save Fields”项，则当前设计的场解也会随之更新。在本书第 1 章的入门实例中提到的观察 T 形波导隔板处于不同位置时的场分布，以及实例二中改变天线臂长度查看远场辐射方向图的操作，都是典型的调谐分析操作。

#### 6.1.5 敏感性分析

敏感性（Sensitivity）分析用于定量衡量各个设计参数微小变化时对仿真模型电磁特性的影响，可以帮助使用者找出哪些设计参数对模型特性有较大的影响，进而将其指定为优化变量。这样可以避免优化速度变慢和迭代发散，减少计算工作量，提高优化设计效率。

在敏感性分析中，优化求解程序搜寻设计的邻近点来得到由变量的微小变化所引起的敏感性。设计点由变量及其归属的物理尺寸定义，灵敏性分析在设计点附近进行，其目的是为所有的设计输出变量计算出二阶回归多项式。算法首先为每一个变量定义一个适当的区间。该区间可根据迭代步数和变量数目进一步划分。如果没有使用主输出变量，则区间由指定的初始变量定义。

当所有的设计变量计算完成时，二阶多项式适用于所有的输出变量。优化程序会给出如下各量的报告：

- (1) 当前变量的回归值；
- (2) 回归的一阶导数；
- (3) 回归的二阶导数。

另外，在敏感性分析中，优化选择求解的设计变量接近于设计点，但并不直接影响分析的数值噪声（这些数值噪声来源于有限单元网络）。优化算法必须以仅有的一个输出变量和这个输出变量的数值噪声为基础，来决定要求解的设计变量。因此，如果已经定义了多个输出参数，则必须为敏感性分析在多个输出参数中选择一个主输出变量（Master Output）。

敏感性分析可为设计模型的工程加工提供公差指导，即对敏感性高的尺寸参数要选择小的公差，而对敏感性低的参数，则可以适当放宽对公差的要求，这样既保证了设计的性能指标，又可以避免盲目要求减小公差带来的工程加工困难和加工成本的提高。

#### 6.1.6 统计分析

统计分析（Statistical）确定设计性能随统计变量变化的分布特性。

统计分析是指利用统计学的观点来研究设计变量的变化对仿真结果的影响，常用的方法是蒙特卡罗法，这种方法利用计算机产生各种不同分布的伪随机数来模拟产生各种设计变量的随机值，并对由此形成的仿真模型进行分析，计算出模型的各种性能的随机值，然后对这些性能随机值进行统计学分类和计算，并绘制出直方图形式的统计图表。其具体的使用将在接下来的应用实例中详细介绍。

## 6.2 HFSS 优化设计实例

为了能更直观地说明 HFSS 的优化设计功能，本节在第 1 章的入门实例一的基础上进行优化设计，优化目标是使 T 形波导端口 3 的输出功率是端口 2 输出功率的 2 倍。本节将通过具体的操作为读者讲解 HFSS 中 Optimetrics 模块各项功能的实现方法和步骤。

首先打开入门实例一的仿真设计，删除求解设置中的扫频分析项 Sweep1，并将其另存为 OptimTee。在入门实例一的建模过程中，我们已经定义了设计变量 offset，并添加了参数扫描设置，因此优化设计的前两步已经完成，这里不再赘述（具体操作可以参照第 1 章的其他小节内容）。接下来从 1.2.4 节开始完成优化设计的其他步骤。由于要优化 T 形波导不同端口的输出功率，所以在进行仿真有效性验证和仿真分析之前，还要为参数扫描添加各端口的功率输出变量，在参数扫描分析过程中计算各端口的功率输出情况，以便对其进行优化。

### 6.2.1 添加输出变量

下面开始为参数扫描分析添加输出变量。一共需要定义 3 个输出变量 Power11、Power21 和 Power31，这 3 个输出变量分别代表 T 形波导端口 1 的输入功率、端口 2 和端口 3 的输出功率。

#### 1. 打开输出变量编辑窗口

首先在工程管理树的“Optimetrics”节点下定义的参数扫描分析“ParametricSetup1”上双击鼠标左键或在其右键菜单中选择“Properties...”命令，打开“Setup Sweep Analysis（参数扫描分析）”对话框，并单击切换至“Calculation”选项卡，如图 6-6 所示。

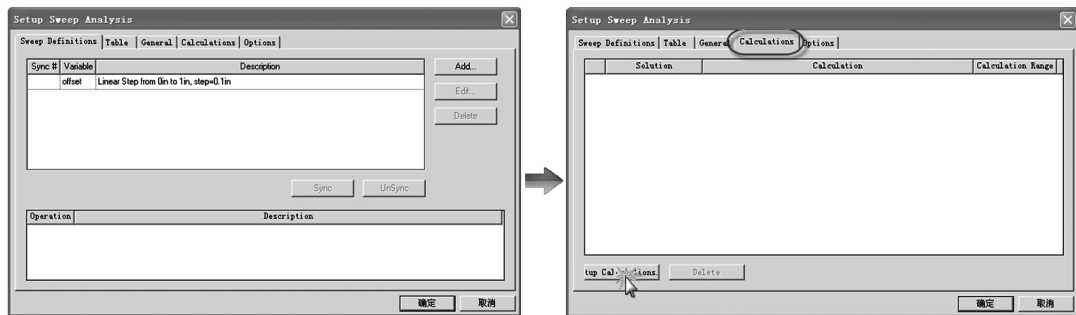


图 6-6 “Setup Sweep Analysis（参数扫描分析）”对话框

在“Calculation”选项卡界面，单击左下角的“Setup Calculation”按钮，打开“Add/Edit

Calculation（添加/编辑计算变量）”对话框，并单击该对话框左下角的“Output Variables...”按钮，打开“Output Variables（输出变量）”对话框，如图 6-7 所示。

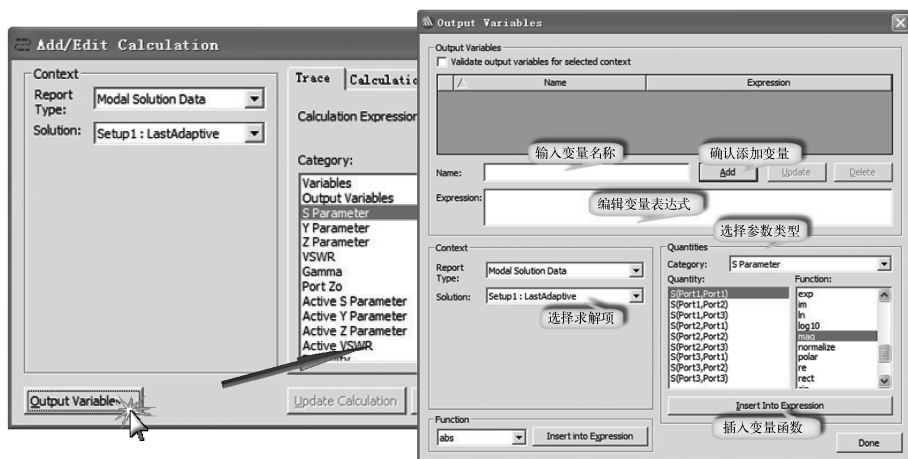


图 6-7 打开“Output Variables（输出变量）”对话框

## 2. 添加输出变量 Power11

首先在“Output Variables（输出变量）”窗口中的“Name”栏输入变量名 Power11，在“Category”栏中选择 S Parameter，在“Quantity”栏中选择参数类型为 S(Port1,Port1)，在“Function”列中选择 mag，然后单击“Insert Into Expression”按钮，将其添加到“Expression”栏中，则在“Expression”栏中将会显示为 mag(S(Port1,Port1))，然后调整光标位置，添加一个括号使表达式位于括号内，在括号的外面再通过键盘输入符号^2，即代表取表达式的平方，这样“Expression”栏中的表达式为(mag(S(Port1,Port1)))^2，最后单击“Add...”按钮将变量 Power11 添加到变量列表中，如图 6-8 所示。

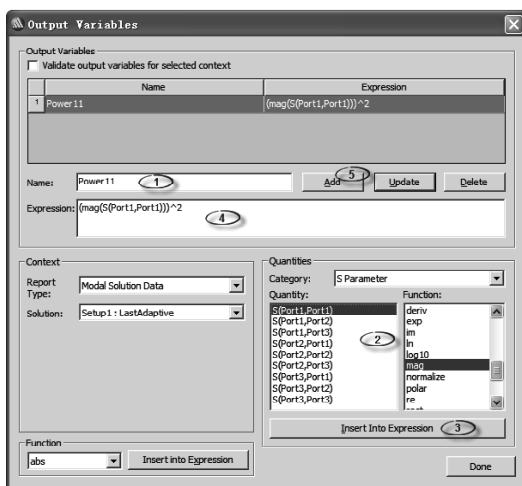


图 6-8 添加输出变量 Power11 的过程

至此就完成了 Power11 输出变量的添加操作。



重复以上步骤，分别添加输出变量 Power21，其最终表达式为 $(\text{mag}(\text{S}(\text{Port2}, \text{Port1})))^2$ ；以及输出变量 Power31，其对应的表达式为 $(\text{mag}(\text{S}(\text{Port3}, \text{Port1})))^2$ 。最后，对话框中定义好的输出变量列表如图 6-9 所示。

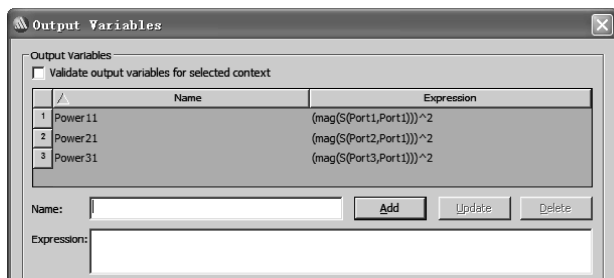


图 6-9 定义好的输出变量列表

### 3. 添加计算变量

添加完成后单击对话框右下角的“Done”按钮完成操作，返回上一级的“Add/Edit Calculation（添加/编辑计算变量）”对话框，在其“Category”栏中选中“Output Variables”项，这样在“Quantity”栏中会显示刚刚添加的 3 个输出变量。先选中变量 Power11，然后单击下面的“Add Calculation”按钮，将其添加为参数扫描计算变量，如图 6-10 所示。重复以上操作，添加 Power21 和 Power31 为计算变量，操作完成后单击对话框右下角的“Done”按钮确认，返回到上一级的“参数扫描分析”对话框，此时可以看到在“Calculations”选项卡的计算变量列表中已经添加入了刚刚定义好的 3 个输出变量，如图 6-11 所示，这代表在接下来的参数扫描分析过程中，这 3 个变量将作为分析计算的对象。

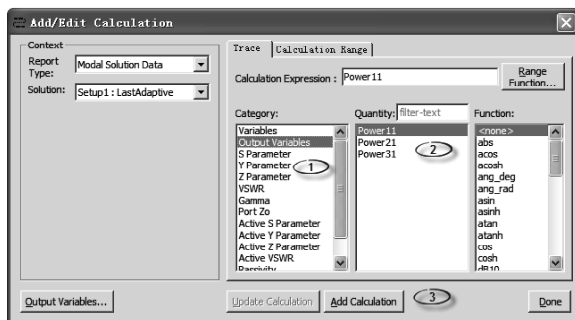


图 6-10 添加为参数扫描计算变量

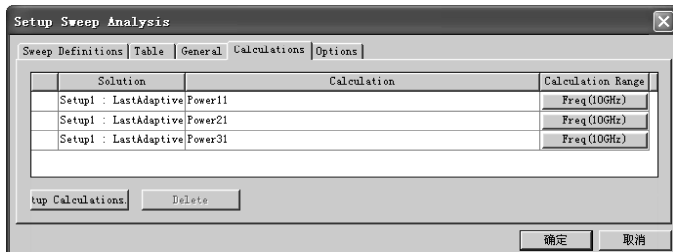


图 6-11 “Calculation”选项卡中的计算变量列表

至此便完成了参数扫描分析设置，接下来执行 1.2.4 节的操作，对设计进行有效性验证和仿真分析。

## 6.2.2 参数扫描分析

仿真分析计算后，信息管理窗口中会显示参数扫描分析已经完成，如图 6-12 所示。

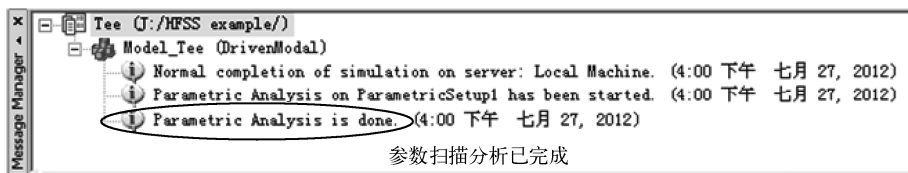


图 6-12 信息管理窗口

接下来就可以通过 HFSS 的数据后处理模块查看不同隔板位置时各端口功率的输出情况了，目的是为下一步的优化设计选择变量的优化区间。

具体操作步骤如下。

(1) 用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在对应的右键快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框。

(2) 在“Report”对话框的“Category”栏中选择 Output Variables，在“Quantity”栏中按住键盘的 Ctrl 键的同时选中变量 Power11、Power21 和 Power31，将窗口上部的“X”项（x 轴变量）选为 offset，最后单击“New Report”按钮，如图 6-13 所示，生成输出变量 Power11、Power21 和 Power31 随设计变量 offset 的变化关系曲线，如图 6-14 所示。

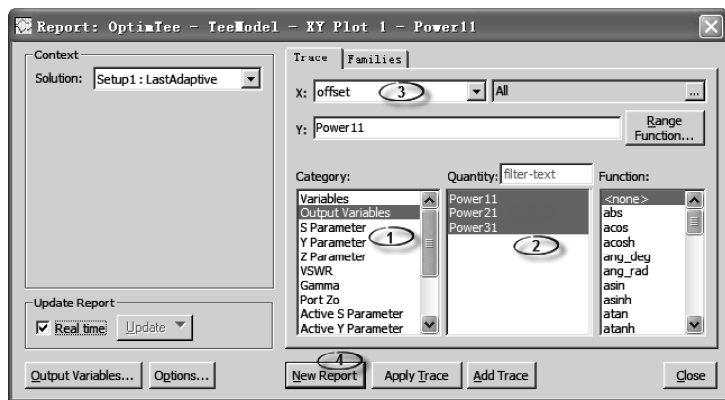


图 6-13 创建图形报告的过程

从创建的曲线报告中可以看出，当变量 offset 逐渐增大时，即隔板位置逐渐向 T 形波导的端口 2 移动时，端口 2 的输出功率逐渐减小，而端口 3 的输出功率逐渐增大；在 offset 等于 0.1 附近，端口 3 的输出功率是端口 2 输出功率的 2 倍左右；当隔板位置超过 0.4in 时，由于端口 1 的反射增加明显，使得端口 3 的输出功率开始减小，所以在下一步的优化设计中可以设置 offset 的优化区间在 0.1in 附近，最大不要超过 0.4in。

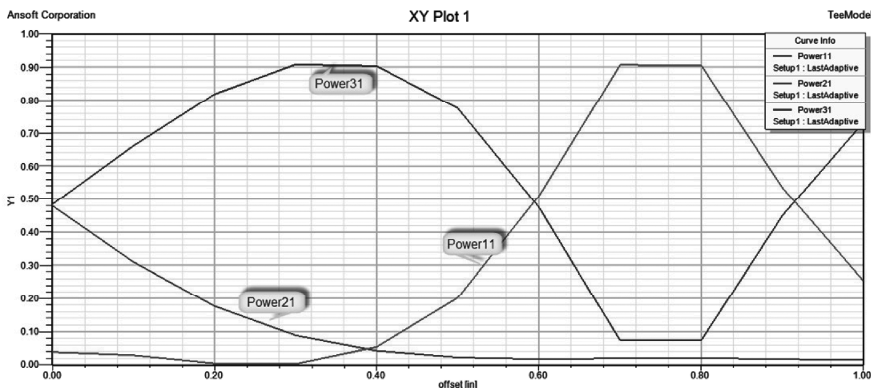


图 6-14 输出变量随 offset 的变化曲线

### 6.2.3 优化设计

经过参数扫描分析后，我们知道了 T 形波导各端口功率随设计变量 offset 的变化关系，下面就添加一个优化设计，由 HFSS 自动求解出隔板的位置，使得端口 3 的输出功率是端口 2 的输出功率的 2 倍。

#### 1. 添加优化设置

(1) 指定优化变量：选择主菜单栏中的“HFSS→Design Properties”命令，打开设计变量的“Properties”对话框，单击“Optimization”按钮切换至优化变量界面，勾选变量“offset”栏中的“Include”项将其指定为优化变量，如图 6-15 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。



图 6-15 指定 offset 为优化变量

(2) 打开“Setup Optimization (优化设置)”对话框：选中工程管理树中的“Optimetrics”节点，打开右键快捷菜单，选择其中的“Add→Optimization...”命令，打开如图 6-16 所示的“Setup Optimization (优化设置)”对话框。

(3) 添加目标函数：在“Setup Optimization (优化设置)”对话框的“Goals”选项卡下，单击左下角的“Setup Calculations”按钮，弹出“Add/Edit Calculation (添加/编辑计算变量)”对话框，在该对话框中不加选择地单击“Add Calculation”按钮，然后单击

“Done”按钮确定，此时在“Cost Function”列表中便添加了新的一行。选中该行的“Calculation”列，然后将表达式改为  $\text{Power31}-2*\text{Power2}$ ，按 Enter 键确认，在“Condition”列选择“=”号，在“Goal”列输入优化目标为 0，在“Weight”列输入 1，并确认“Solution”列为 Setup1: LastAdaptive。至此就添加了一个优化目标函数，它代表使 Setup1: LastAdaptive 求解项中的输出变量 Power31 的值是 Power21 的 2 倍。

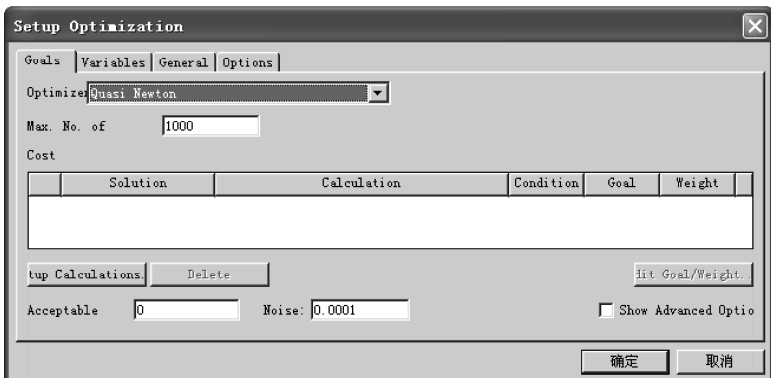


图 6-16 “Setup Optimization (优化设置)”对话框

(4) 设置“Goals”选项卡的其他内容：在“Optimizer (优化算法)”项选择 Quasi Newton，即优化采用拟牛顿算法；在“Max.No.of Iterations (迭代次数)”项保持默认值 1000 不变，即优化迭代次数最多为 1000 次，如果优化迭代了 1000 次后，还没有达到优化目标，则优化分析将终止计算；在“Acceptable (优化阈值)”项输入 0.0005，代表目标函数的值小于或等于 0.0005 时，便认为达到了优化目标，优化分析随即停止；“Noise (噪声)”项保持默认值 0.0001 不变，此时“Setup Optimization (优化设置)”对话框的“Goals”选项卡形式如图 6-17 所示。

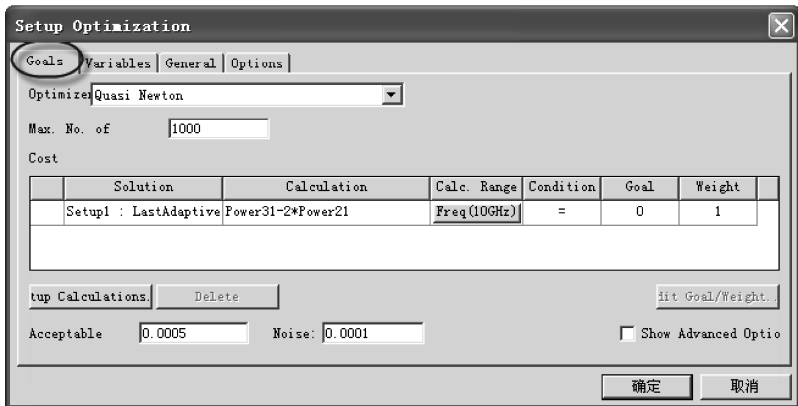


图 6-17 设置完成后的“Goals”选项卡

(5) 指定优化变量取值范围：单击切换至“Variables”选项卡，在其“Variable”列表中勾选优化变量 offset 对应的“Override”复选框，在初始值“Starting Value”列输入 0.1，勾选“Include”列，分别设置优化变量最小值“Min”为 0，最大值“Max”为 0.3，设置完成

后的“Variables”选项卡如图 6-18 所示。

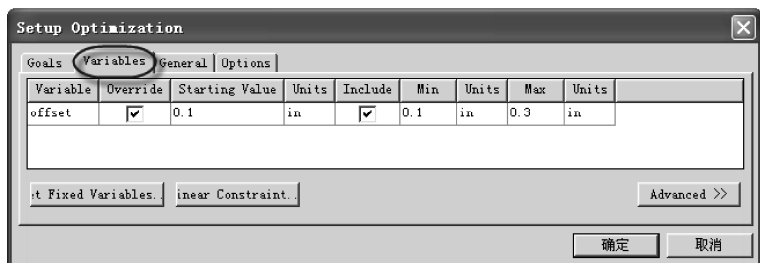


图 6-18 设置完成后的“Variables”选项卡

(6) 单击切换至“General”选项卡，勾选下面的“Update design Parameter values after optimization”复选框，指定优化完成后仿真模型直接采用优化后的变量；再切换到“Options”选项卡，确认不勾选任何选项。至此，就完成了优化设置，单击“确定”按钮退出。

(7) 优化分析：优化设置完成后，会自动添加到工程管理树的“Optimetrics”节点下，默认名称为 OptimizationSetup1，选中该优化设置名称，单击鼠标右键，选择快捷菜单中的“Analyze”命令运行优化分析，在进程管理窗口中会显示优化进度，在信息管理窗口中会显示与优化相关的信息。

## 2. 查看优化分析结果

优化完成后，信息管理窗口会显示相关分析已完成的内容，如图 6-19 所示。

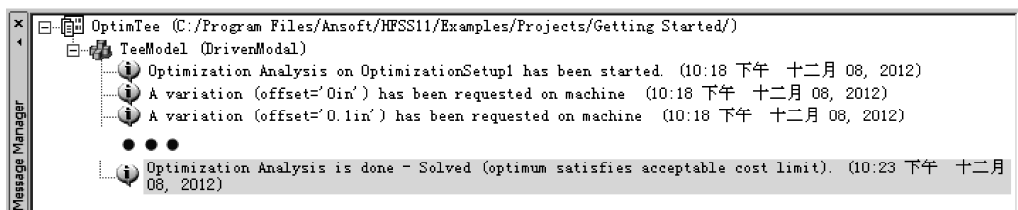


图 6-19 优化分析完成后的信息管理窗口

### 1) 查看优化迭代收敛情况

在工程管理树的“Optimetrics”节点下选中添加的优化设置 OptimizationSetup1，单击鼠标右键打开对应的快捷菜单，选择其中的“View Analysis Result...”命令，如图 6-20 所示，打开“Post Analysis Display”对话框。

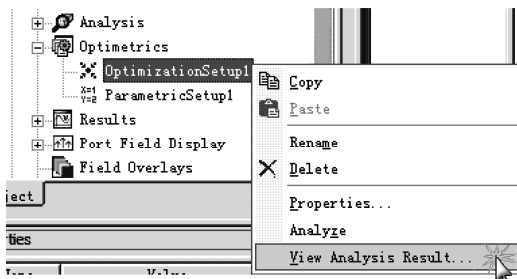
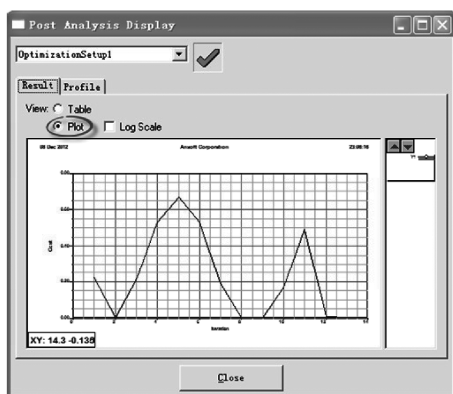
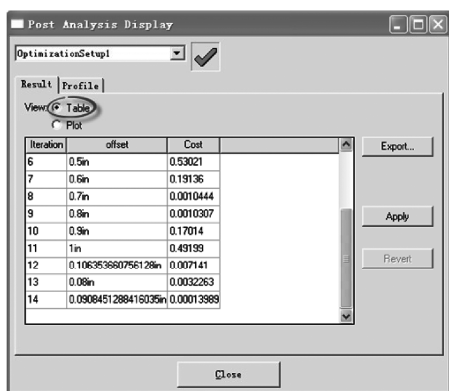


图 6-20 执行查看优化分析结果命令

通过该对话框可以查看到每一次迭代目标函数的收敛情况。用户可以通过选择表格或曲线这两种显示形式查看收敛过程，如图 6-21 所示。



(a) 图形曲线显示



(b) 数据列表显示

图 6-21 查看优化分析结果

由图 6-21 可见，在本次优化分析过程中，优化变量 offset 在第 14 次迭代时，即 0.0908 附近时，目标函数到达所设定的最佳值。单击“Close”按钮可关闭显示窗口。

当优化分析结果以数据列表形式显示时，可以查看到每一次迭代后，目标函数的值。单击对话框右侧的“Export...”按钮可以将优化数据导出。导出文件支持的格式有\*.csv、\*.tab、\*.dat 及\*.txt。如果想应用非最优变量结果，只需选中对应的结果项，然后单击对话框右侧的“Apply”按钮即可，如图 6-22 所示。

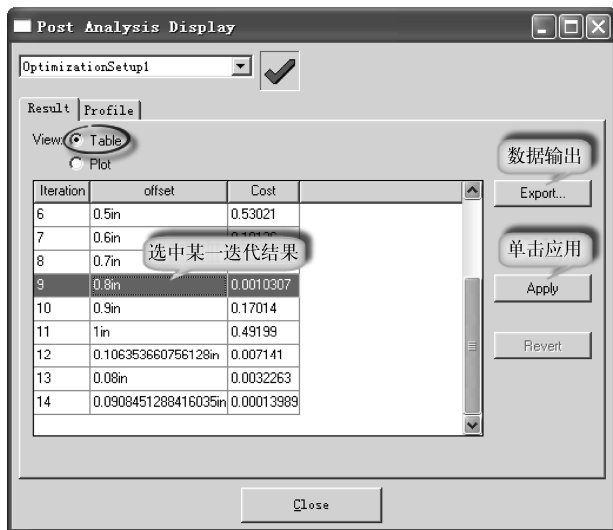


图 6-22 优化结果的导出与应用

## 2) 查看优化结果

优化结束后，优化变量已经自动修改为优化后的最佳值，此时用鼠标右键单击工程管理

树的“Analysis”节点下的“Setup1”项，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，对 T 形波导模型进行分析。分析完成后，用鼠标右键单击工程树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，在弹出的“Report”对话框中选择输出变量 Power21 和 Power31，offset 值选择优化后的最佳值，单击“New Report”按钮，得到两端口的功率输出，如图 6-23 所示，此时端口 3 的功率为 0.6439，端口 2 的功率为 0.3223，两者接近为 2 倍关系，达到了优化目的。

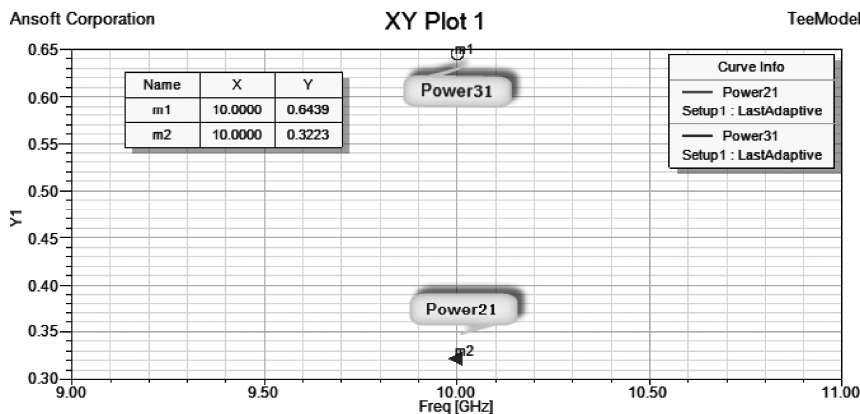


图 6-23 优化后 2、3 端口的功率输出

分析完成后，选择 T 形波导的上表面，执行“HFSS→Fields→Plot Fields→E→Mag\_E”命令，绘制场分布情况，如图 6-24 所示。

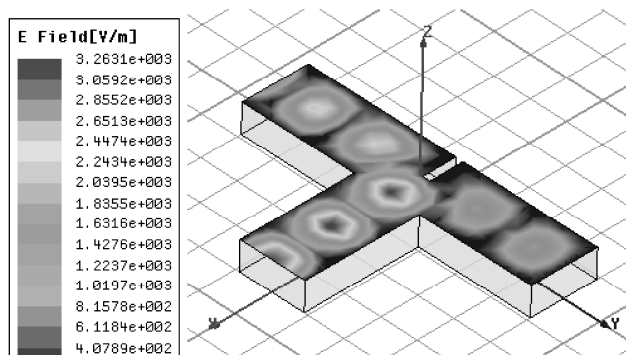


图 6-24 优化后的场分布情况

至此就完成了 T 形波导不等功率输出的优化设计。本例只是一个简单的单目标函数优化，目的是使读者对 HFSS 的优化设计有一个感性的认识。关于 HFSS 优化功能模块的应用，还需要读者在实际使用中多加练习和总结。

### 6.3 HFSS 优化设计的注意事项

(1) HFSS 的 Optimetrics 优化模块并不是一个万能的工具，如果优化设置不够合理，



HFSS 在进行优化分析时不仅得不到最佳结果，还会浪费大量的计算时间。因此，在进行优化设置时必须事先利用参数扫描为优化变量确定一个足够小的优化区间，让优化分析很好地收敛于全局最优解。如果不进行参数的扫描，而直接进行优化，则每次优化的结果可能仅仅是局部最佳值。

（2）能不能成功找到最优解与设置密切相关。总的来说，限制越多，要求越高，优化结果就越难得到，例如，如果变量的最小间隔过大，没有足够多的点作为最优选择，变量间隔设置过小，优化的过程将变得漫长且最后得到的结果无法实现。初始点的设置应尽量接近参数扫描的最优点，否则也可能得不到最优解。

（3）优化的过程也可以用多次参数扫描分析来实现，即设置参数扫描时，将变量扫描范围定义在上一次最佳值点的附近，然后进行分析，以确定更加精确的最优值。依次迭代分析下去，直到找到满足要求的最佳变量值为止。



# 第二部分 实 例 篇

## 第7章 八木-宇田天线仿真实例

从本章开始，我们将结合实际工程应用实例，讲解如何使用 HFSS 软件分析、设计各种工程问题。本书选取 HFSS 软件在微波无源元件、微波天线、电磁兼容、电磁散射、频率选择表面等实际工程领域的典型应用，从原理分析、仿真思路、具体建模、求解分析及后处理等方面详细进行介绍，不仅有利于读者进一步学习掌握 HFSS 软件的各项基本操作和技巧，而且对于解决实际工程问题提供了一个有效的解决方案。本章主要介绍八木-宇田天线的仿真设计。

### 7.1 八木-宇田天线概述

八木-宇田（Yagi-Uda）天线是在 20 世纪 20 年代由日本东北大学的 Hidetsugu Yagi 和 Shintaro Uda 率先研制出的，这种天线随即被命名为“八木-宇田天线”，简称“八木天线”。传统的八木天线通常由置于同一平面内的一根有源振子和几根无源振子组成，其中无源振子包含一根反射器和几根甚至几十根引向器，适当调节整个振子的长度和间距可以获得较好的指向引向器的端射特性。七元八木天线的结构如图 7-1 所示。

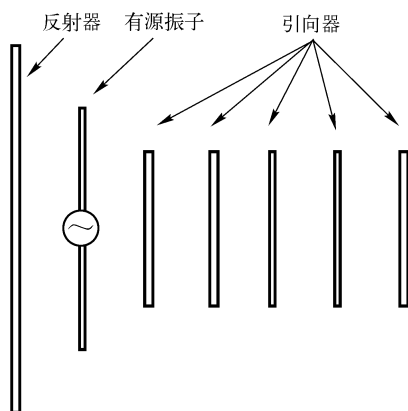


图 7-1 七元八木天线的结构

八木天线从问世以来，就因其结构简单，增益较高而广泛应用于超短波段通信、电视和雷达系统中。



## 7.2 八木-宇田天线的原理分析

由于八木天线存在有源振子和无源振子及无源振子之间的互耦，所以进行严格的理论分析十分困难。八木天线的分析和设计一般采用数值计算和实验相结合的方法进行。

八木天线的设计内容主要包括根据给定的增益、波瓣宽度、副瓣电平、前后辐射比、驻波比及工作带宽确定天线的振子数、各振子长度及直径、各振子间的间距等几何尺寸。一般来说，引向器的数目越多，天线的增益越高，因此设计八木天线时首先应根据所需的增益确定振子的数目。

有源振子的长度约为半波振子或折合振子的长度。考虑其终端效应，其长度一般取  $0.475\lambda$ 。振子越粗，其长度越短。引向器有均匀和不均匀两种结构。均匀结构中各引向器的长度及它们之间的距离都相等，不均匀结构中它们的长度和间距都不相等。一般来说，均匀结构的主瓣较窄，副瓣电平较高，不均匀结构则相反。引向器之间的距离及引向器到有源振子的距离一般取  $0.1\lambda \sim 0.4\lambda$ ，引向器的长度一般取为等长，其长度比有源振子短  $10\% \sim 20\%$ ，或取  $0.38\lambda \sim 0.44\lambda$ 。这种方案加工容易但频带较窄。另一种方案是采用不等长的引向器，该方案的关键是确定有源振子与第一个引向器之间的距离，该距离对天线的前后辐射比和天线的阻抗影响较大，距离对抑制后向辐射有利，但阻抗的频率特性较差，与馈线匹配较困难，一般取  $0.1\lambda \sim 0.25\lambda$ ，其长度比有源振子长  $5\% \sim 10\%$ 。多元八木天线最佳等间距如表 7-1 所示。

表 7-1 多元八木天线最佳等间距

振子数目	$d_r/\lambda$	$d_{01}/\lambda$	$d_{12}/\lambda$	$d_{23}/\lambda$	$d_{34}/\lambda$	$d_{45}/\lambda$	$d_{56}/\lambda$
2	0.15~0.2						
2		0.07~0.11					
3	0.16~0.23	0.16~0.19					
4	0.18~0.22	0.13~0.17	0.14~0.18				
5	0.18~0.22	0.14~0.17	0.15~0.2	0.17~0.23			
6	0.16~0.2	0.14~0.17	0.16~0.25	0.22~0.30	0.25~0.32		
8	0.16~0.2	0.14~0.16	0.18~0.25	0.25~0.35	0.27~0.32	0.27~0.33	0.30~0.4
>8	0.16~0.2	0.14~0.16	0.18~0.25	0.25~0.35	0.27~0.32	0.27~0.33	0.35~0.42

注： $d_r$  为反射器与有源振子之间的距离； $d_{ij}$  为相邻两振子之间的距离，有源振子的下标为 0。

## 7.3 HFSS 仿真设计概述

本章设计的八木天线为五元八木天线。根据 7.2 节的设计原则选取天线的初始结构尺寸，如图 7-2 所示。

有源振子采用圆柱形对称偶极子；偶极子采用集总波端口激励；反射器和引向器均为金属圆柱；振子垂直于  $xy$  平面；天线的引向器指向  $y$  轴的正方向；金属振子材料为铝；选择长方体作为辐射空气腔并设置辐射边界。该天线的工作频率为 3GHz，因此进行求解设置时，自适应网格剖分频率设置为 3GHz，求解中心频率设置为 3GHz 并添加 2.5~3.5GHz 的扫频设置。

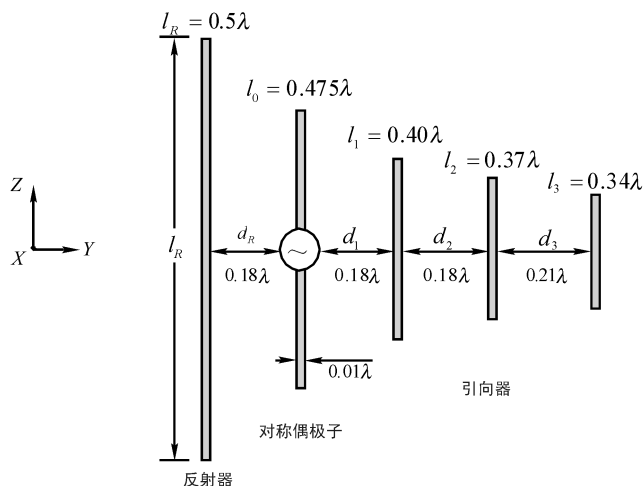


图 7-2 五元八木天线结构

HFSS 仿真的相关设置如下所示。

- (1) 求解类型：模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位：毫米 (mm)。
- (3) 边界条件：辐射边界条件。
- (4) 激励类型：集总端口激励。
- (5) 求解及扫频设置：求解频率为 3GHz，扫频范围为 2.5~3.5GHz。
- (6) 查看参数： $S$  参数扫频曲线、VSWR、天线方向图、天线参数。

下面介绍详细的仿真设计过程。

## 7.4 创建工程设计

### 7.4.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令（如图 7-3 所示），或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件。



图 7-3 启动 HFSS 软件

当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Model\_Antenna。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 YU\_antenna.HFSS，步骤如图 7-4 所示。

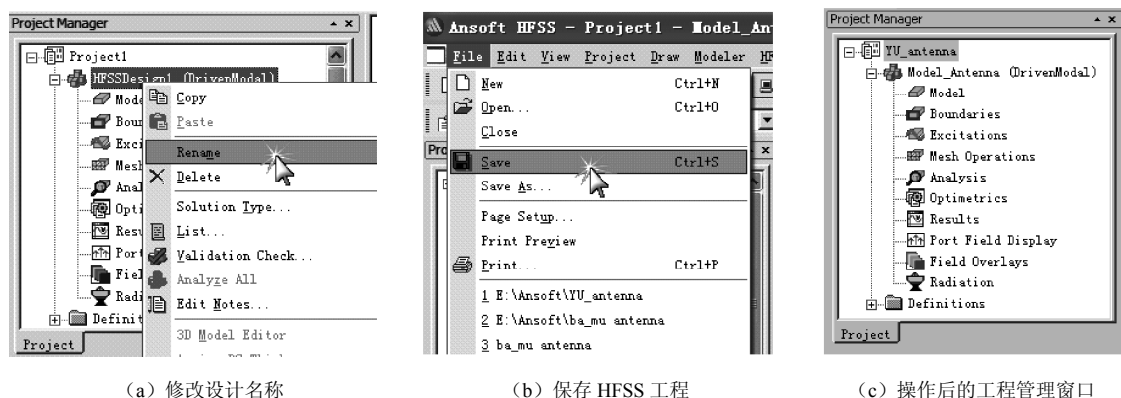


图 7-4 创建并保存新工程

### 7.4.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type...”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 7-5 所示。

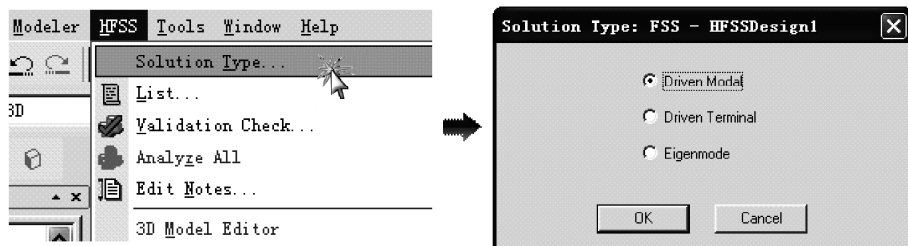


图 7-5 设置求解类型

### 7.4.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 7-6 所示。

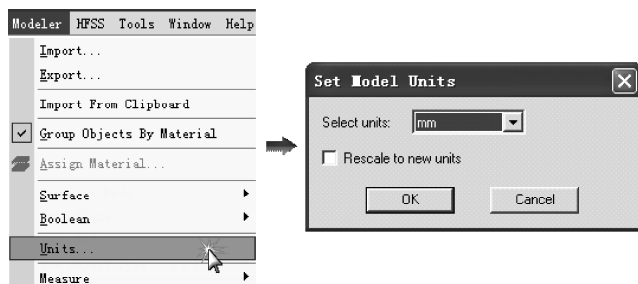


图 7-6 设置模型尺寸单位

#### 7.4.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选上窗口最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，步骤如图 7-7 所示。勾选此项目的目的是为了在建模操作过程中，当创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出物体模型的“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令分别打开物体模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

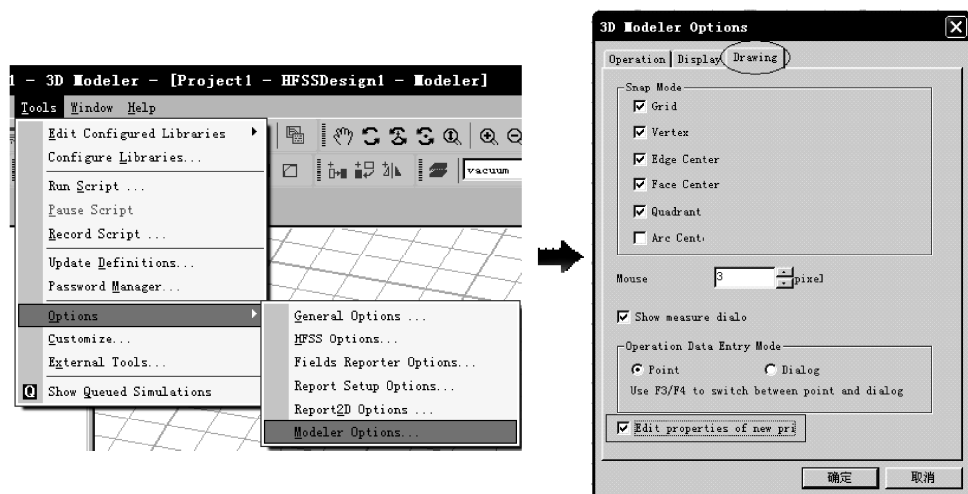


图 7-7 设置“3D Modeler Options”对话框

### 7.5 创建八木天线的仿真模型

#### 7.5.1 定义设计变量

定义的相关设计变量有：工作波长  $\lambda = 100\text{mm}$ ，反射器长度  $LR = 0.5 \cdot \lambda$ ，偶极

子长度  $L_0 = 0.475 \cdot \lambda$ ，3 个引向器长度分别为  $L_1 = 0.4 \cdot \lambda$ 、 $L_2 = 0.37 \cdot \lambda$  和  $L_3 = 0.34 \cdot \lambda$ ，反射器与偶极子间距  $d_R = 0.18 \cdot \lambda$ ，偶极子与第一个引向器间距  $d_1 = 0.18 \cdot \lambda$ ，引向器之间的距离分别为  $d_2 = 0.18 \cdot \lambda$  和  $d_3 = 0.21 \cdot \lambda$ ，圆柱体半径  $rad = 0.01 \cdot \lambda$ ，激励端口平面高度  $gap = 0.4mm$ 。

首先定义设计变量  $\lambda = 100mm$ 。在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的设计变量的“Properties”对话框中单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称  $\lambda$ ，在“Value”栏中给变量赋值  $100mm$ ，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量  $\lambda$ 。变量定义步骤如图 7-8 所示。

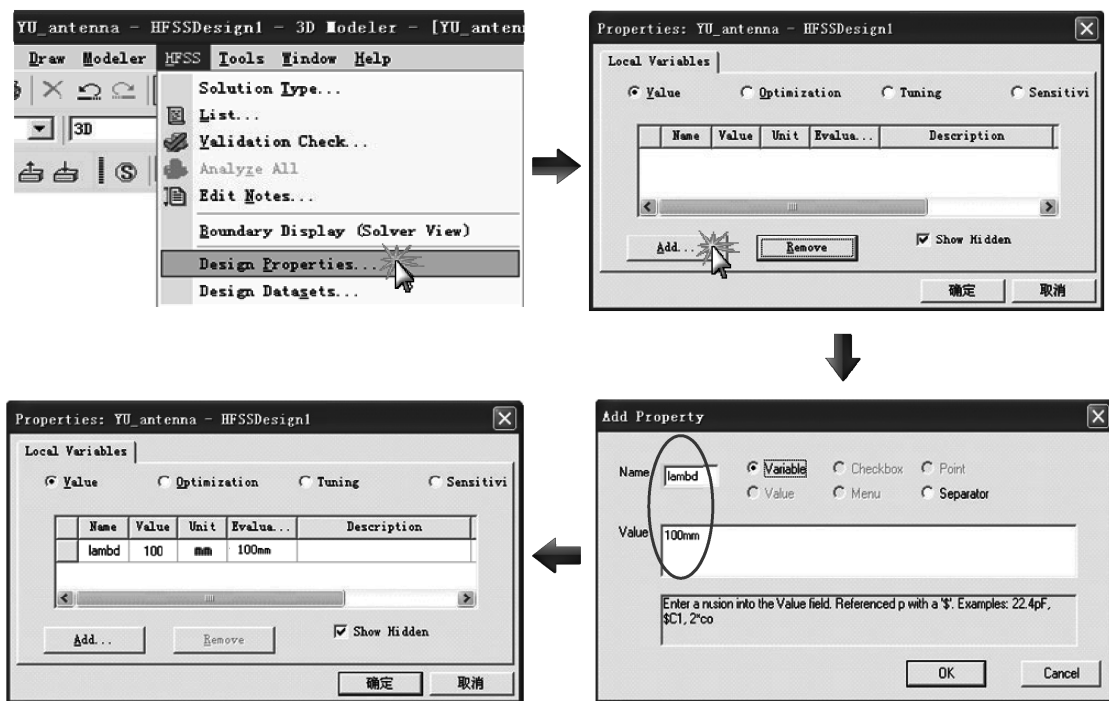


图 7-8 定义设计变量  $\lambda$

再次单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入反射器长度变量名称 LR，在“Value”栏中给变量赋值  $0.5 \cdot \lambda$ ，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 LR。

重复以上步骤添加其他设计变量，添加完成后的设计变量列表如图 7-9 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。

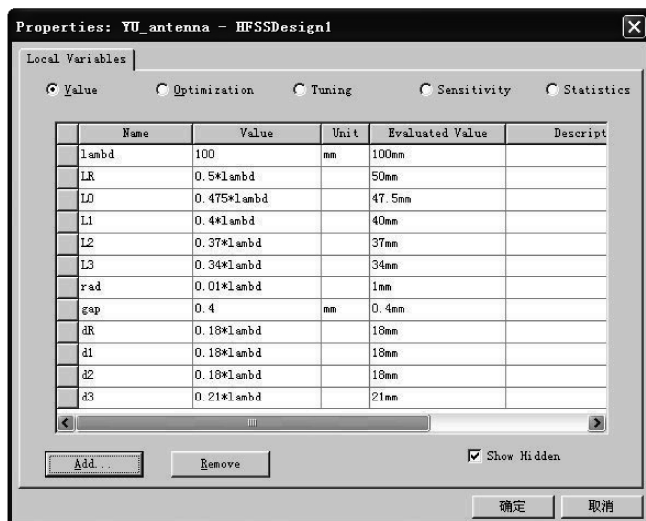


图 7-9 操作完成后的设计变量列表

## 7.5.2 设置模型的默认材料

在工具栏中展开模型材料的下拉菜单，选择“Select...”命令，打开“Select Definition”对话框，在对话框的“Materials”选项卡中选择 HFSS 设计的默认模型材料为 aluminum，如图 7-10 所示。设置完成后，对应的材料窗口中将会显示出当前设计默认的模型材料为 aluminum，即在此默认状态下，所创建的模型材料属性将被自动定义为 aluminum。

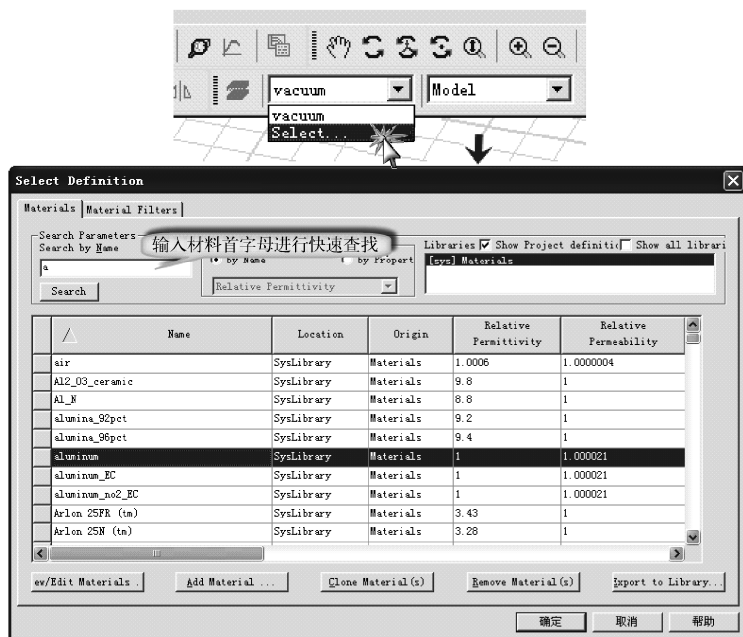



图 7-10 设置物体模型的默认材料为 aluminum

注意，在 HFSS 材料库中选取现有材料时，HFSS 提供了两个快速查找途径：一个途径是通过材料名称（by name）进行查找，此时用户只需要在“Search by Name”项中输入所要查找材料名的全称或首字母就可以进行快速查找了；另一个途径是通过材料属性（by Property）进行查找，此时用户首先需要选择“by Property”单选按钮，并在其下面的选项下拉菜单中选择想要查找的材料属性，如相对介电常数等，然后在“Search by Name”项中输入具体的数值，再单击“Search”按钮或按 Enter 键进行查找。

### 7.5.3 创建有源对称振子

#### 第一步：创建对称振子单臂模型

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Cylinder”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆柱体模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态，首先移动鼠标至坐标轴原点并单击左键确定圆柱体中心位置，然后移动鼠标在  $xy$  平面绘制出一个圆形后，在任意点单击鼠标左键确定圆柱体半径，再向  $z$  轴正方向移动鼠标，绘制出圆柱体形状后，在任意点单击鼠标左键确定圆柱体的高度。这样任意一个圆柱体模型就创建完成了，步骤如图 7-11 所示。

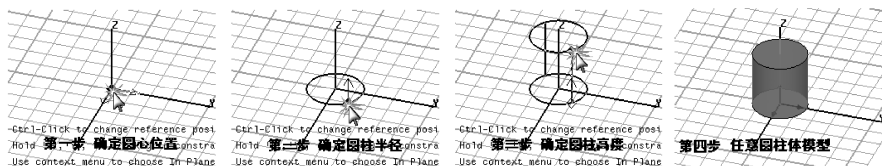


图 7-11 创建任意圆柱体模型的步骤

操作完成后，在生成圆柱体模型的同时，会自动弹出圆柱体模型的“属性”对话框，如图 7-12 所示，如果没有弹出“属性”对话框，用户可以按照 7.4.4 节介绍的方法进行相关设置。接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项，具体操作为：在“属性”对话框的“Command”选项卡中编辑圆柱体的位置尺寸属性，将中心点位置“Center Position”项修改为 0mm, 0mm, gap/2；对称轴“Axis”项选为 Z 轴；半径“Radius”项输入变量 rad；高度“Height”项输入  $L0/2 - gap/2$ ，如图 7-12 (a) 所示。

单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的“Cylinder1”改为 dipole，其他选项保持默认设置不变，如图 7-12 (b) 所示。

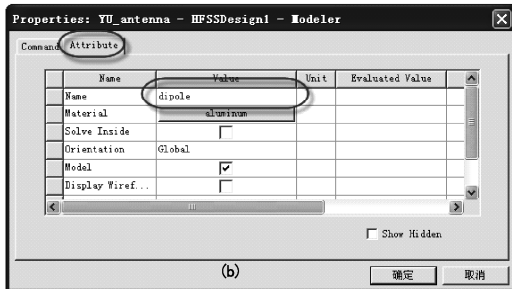
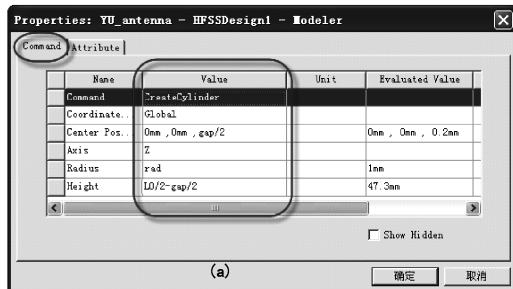


图 7-12 修改后的“Command”和“Attribute”选项卡



编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的对称偶极子的一个臂 dipole，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型，如图 7-13 所示。

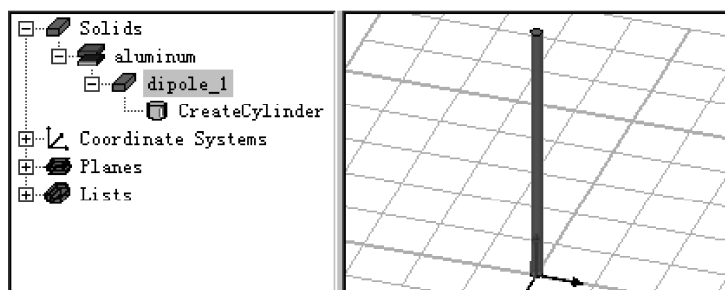



图 7-13 偶极子单臂模型

### 第二步：复制生成偶极子的另一个臂

首先选中刚刚创建的 dipole 模型（既可以单击操作历史树中的模型名称 dipole，也可以在显示窗口用鼠标直接点选模型），然后在选中的状态下在主菜单栏中选择“Edit→duplicate→Around Axis”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，弹出“Duplicate Around Axis（绕坐标轴旋转复制）”对话框，在该对话框的“Axis”项中选择旋转复制轴为 Y 轴，在“Angle”项输入旋转角度为 180deg，设总个数“Total number”为 2，并勾选“Attach To Original Object”选项，再单击“OK”按钮执行操作，弹出模型的“属性”对话框，选取默认设置，最后单击“确定”按钮，生成与原天线臂合二为一的 dipole 模型，如图 7-14 所示。

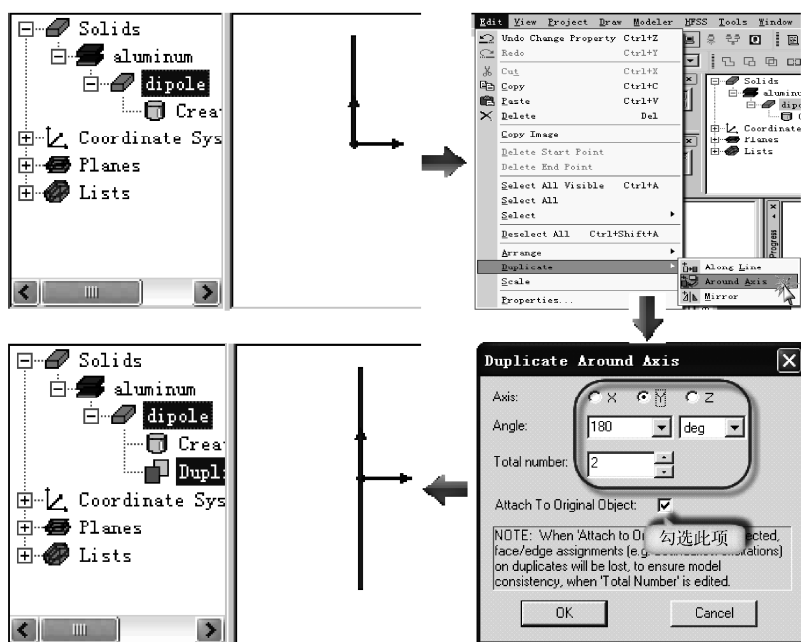



图 7-14 复制生成偶极子的另一臂的步骤

至此，完成了有源振子模型的创建操作，再次按下 **Ctrl+D** 键，以适当尺寸显示模型。

### 7.5.4 创建反射器模型

由于该八木天线的反射器也为圆柱体铝棒，所以其创建过程与有源振子单臂的操作类似。首先选择绘制圆柱体命令“**Draw→Cylinder**”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆柱体模型状态。然后在模型显示窗口中创建一个任意的圆柱体模型，再在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“**Command**”选项卡的中心点位置设为  $0\text{mm}$ ， $-dR$ ， $-LR/2$ ，对称轴选为 **Z** 轴，半径设为  $rad$ ，高度设为  $LR$ ；“**Attribute**”选项卡中的“**Name**”项修改为 **reflector**，如图 7-15 所示，最后单击“确定”按钮完成操作。

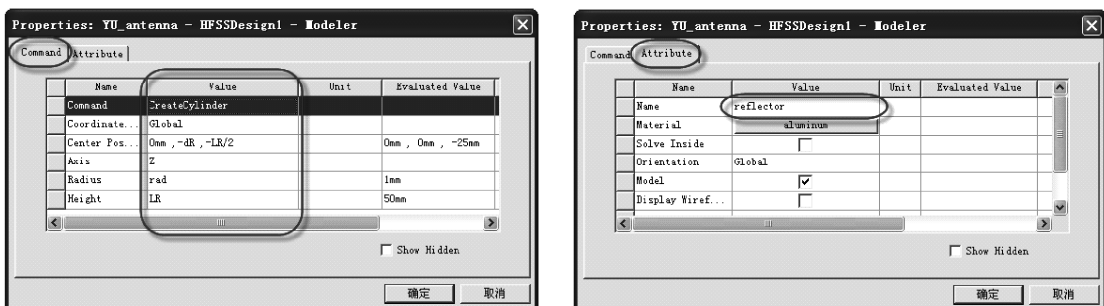


图 7-15 反射器的“属性”对话框


创建完反射器后的模型如图 7-16 所示。



图 7-16 有源振子与反射器模型

### 7.5.5 创建引向器模型

#### 1. 创建第一个引向器

首先创建与有源振子相邻的第一个引向器。选择绘制圆柱体命令“**Draw→Cylinder**”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆柱体模型状态。然后在模型显示窗口中创建一个任意的圆柱体模型，再在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改

和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为  $0\text{mm}, d1, -L1/2$ ，对称轴设为 Z 轴，半径设为 rad，高度设为  $L1$ ；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 director1，如图 7-17 所示，最后单击“确定”按钮完成操作。

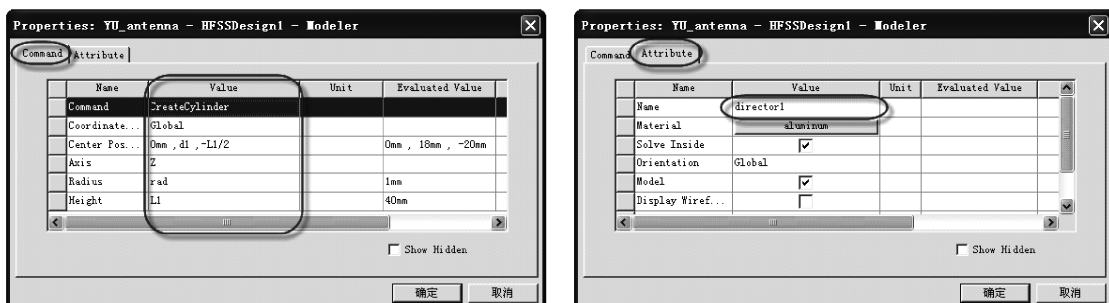



图 7-17 第一个引向器模型属性

## 2. 创建第二个引向器

选择绘制圆柱体命令“Draw→Cylinder”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆柱体模型状态。然后在模型显示窗口中创建一个任意的圆柱体模型，再在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为  $0\text{mm}, d1+d2, -L2/2$ ，对称轴设为 Z 轴，半径设为 rad，高度设为  $L2$ ；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 director2，如图 7-18 所示，最后单击“确定”按钮完成操作。

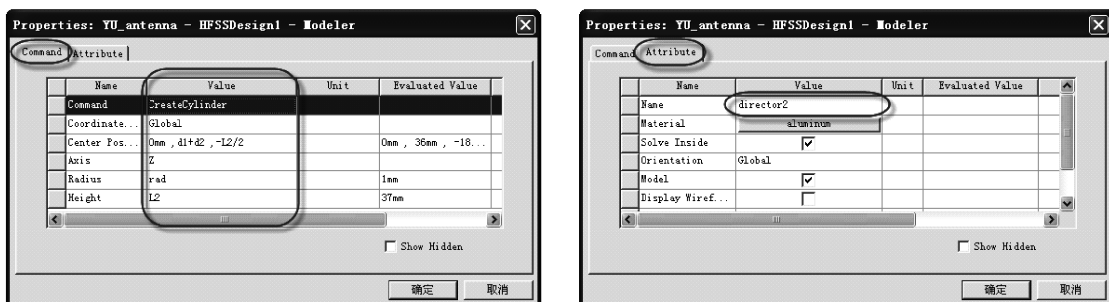



图 7-18 第二个引向器模型属性

## 3. 创建第三个引向器

选择绘制圆柱体命令“Draw→Cylinder”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆柱体模型状态。然后在模型显示窗口中创建一个任意的圆柱体模型，再在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为  $0\text{mm}, d1+d2+d3, -L3/2$ ，对称轴设为 Z 轴，半径设为 rad，高度设为  $L3$ ；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 director3，如图 7-19 所示，最后单击“确定”按钮完成操作。

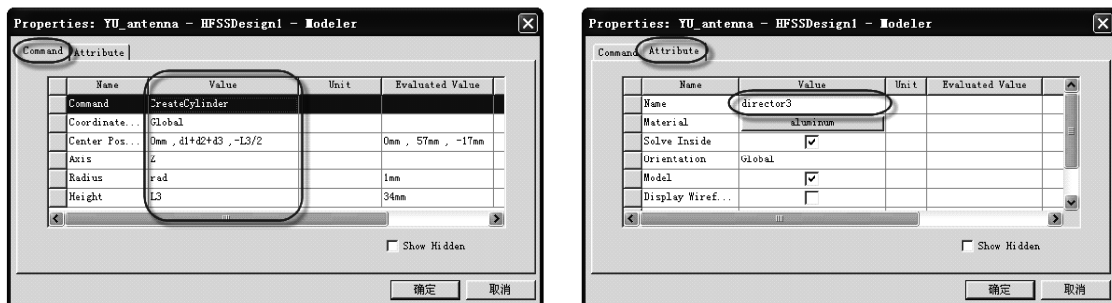


图 7-19 第三个引向器模型属性

创建完三个引向器后，按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角。然后再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的五元八木天线仿真模型如图 7-20 所示。

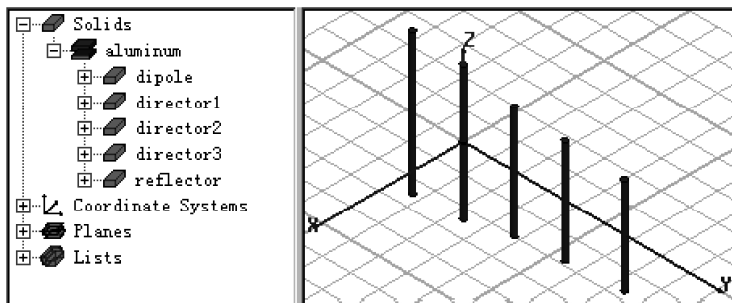



图 7-20 五元八木天线仿真模型

## 7.6 设置激励及边界条件

### 7.6.1 设置集总端口激励

#### 1. 创建端口激励平面

为了在对称偶极子的上、下臂之间设置集总端口激励，首先需要添加一个激励平面。在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮, 执行矩形平面绘制命令后，用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 Rectangle1，并弹出矩形的“属性”对话框，在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为 0mm, -rad, -gap/2，对称轴“Axis”项设为 X 轴，Y 轴向长度“YSize”设为 2\*rad，Z 轴向长度“ZSize”设为 gap；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 port，单击“Color”选项中的“Edit”按钮，在弹出的调色窗口选择红色，设置完成后的“属性”对话框如图 7-21 所示，最后单击“确定”按钮完成操作。

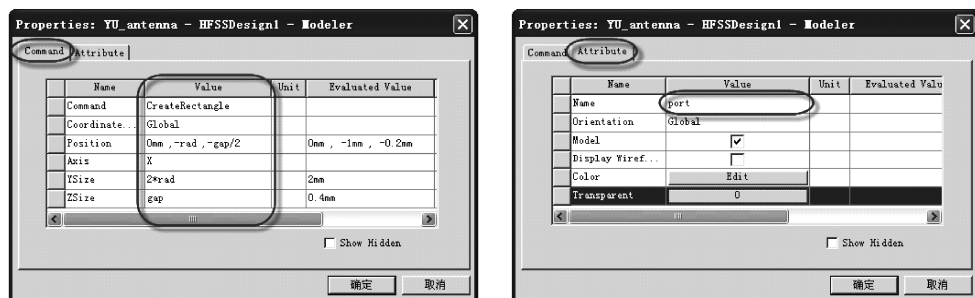




图 7-21 绘制任意矩形并修改“属性”对话框

至此便完成了在天线两臂之间创建一个激励平面，下面进行局部放大来查看该激励平面。在工具栏中单击快捷放大按钮，此时鼠标变为十字形状，表示进入选择状态，移动鼠标至有源振子两臂之间的位置，按住鼠标左键拖出一个矩形框将两臂之间的缝隙包含在内，再单击鼠标左键确定，此时将会放大显示所选区域，反复以上操作直到可以看清所创建的端口激励平面为止，如图 7-22 所示，再次单击按钮便可退出放大模式。

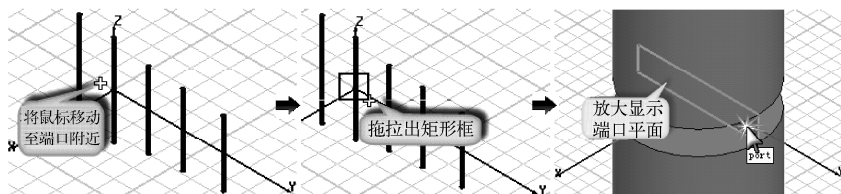


图 7-22 局部放大显示端口激励

## 2. 设置集总端口激励

选中刚刚创建好的 Port 平面（既可以在放大显示状态下直接用鼠标点选该平面，也可以在操作历史树的“Sheets”节点下选择激励平面 Port 的名称），在选中的状态下在显示窗口中单击鼠标右键，选择“Assign Excitation”中的“Lumped Port”命令，如图 7-23 所示，弹出如图 7-24 左图所示的“Lumped Port: General（通用）”对话框，在“Name”项默认激励名称为 LumpPort1，单击“下一步”按钮继续。在弹出的“Lumped Port: Modes（模式）”对话框（如图 7-24 右图所示）中，单击“Integration Line”栏中“None”右边的倒三角形，从其下拉菜单中选择“New Line...”命令来绘制积分线。

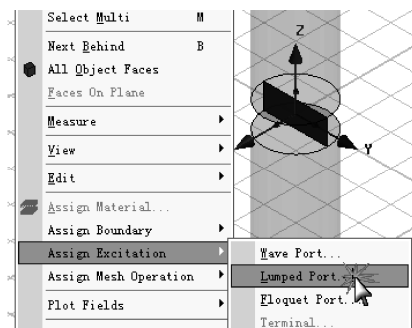


图 7-23 选中激励平面并执行添加端口激励命令

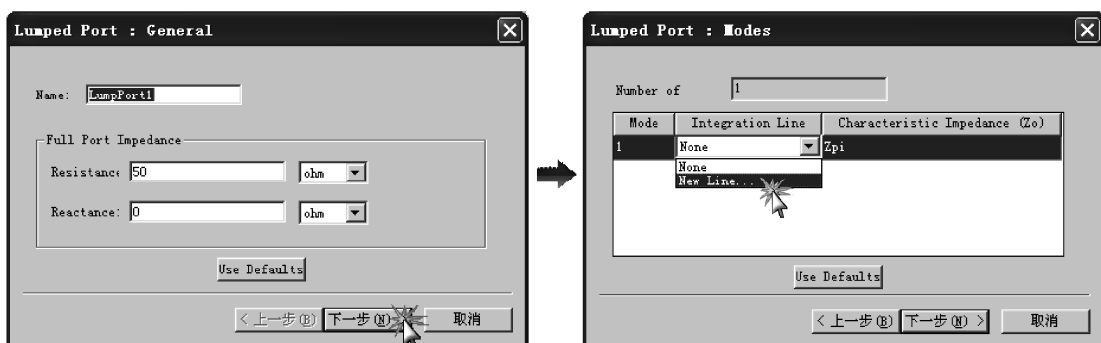


图 7-24 添加集总端口激励

选择“New Line...”命令后会进入积分线绘制模式。首先在 HFSS 界面最下端的状态栏的“X”、“Y”和“Z”文本框中输入积分线起点坐标(0,0,-0.2)，然后按 Enter 键确定；紧接着在状态栏的“dX”、“dY”和“dZ”文本框内分别输入积分线终点相对坐标(0,0,0.4)，再次按 Enter 键确认。两次输入状态如图 7-25 所示。

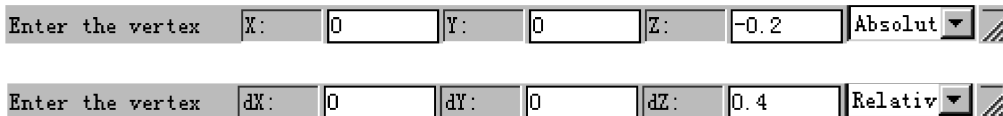


图 7-25 绘制积分线时的状态栏

绘制完积分线后单击“模式”对话框中的“下一步”按钮继续，会弹出“Lumped Port: Post Processing (后处理)”对话框，保持默认设置，并单击“完成”按钮，如图 7-26 所示。

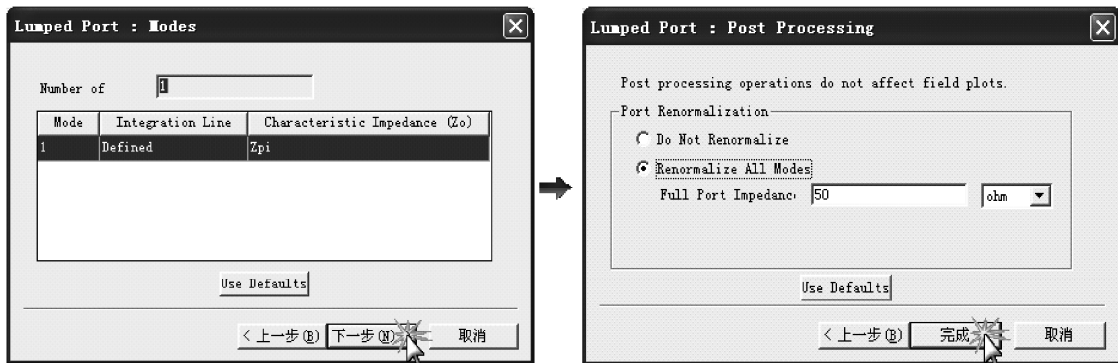


图 7-26 归一化端口阻抗

端口激励设置操作完成后，创建的端口激励 LumpPort1 会显示在工程管理窗口的“Excitations”节点下，点选并局部放大查看所创建的端口激励，如图 7-27 所示。

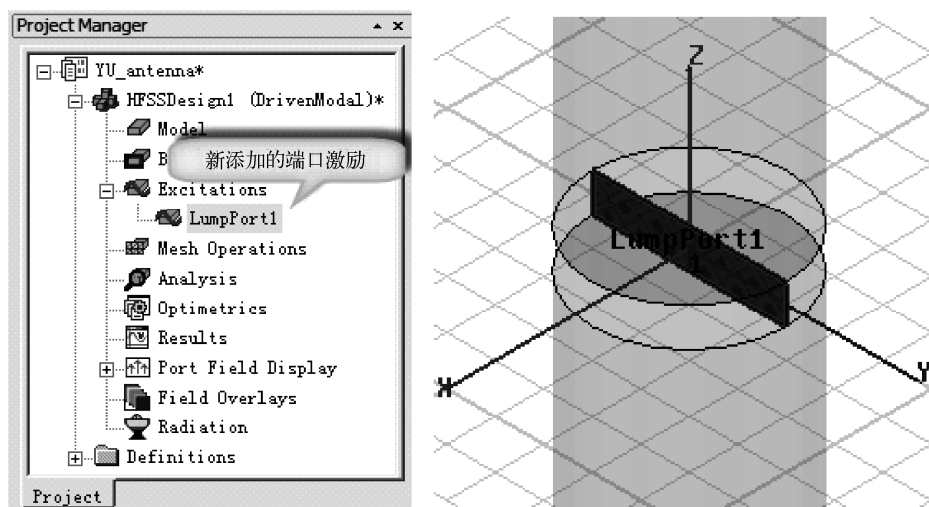



图 7-27 单击查看 Lumped Port 端口激励

最后再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。


### 7.6.2 设置辐射边界条件

为了模拟无限大辐射空间，需要对计算区域进行截断并设置辐射边界条件，方法是创建一个长方体空气腔将天线包含在其中，在其表面施以辐射边界条件。长方体的尺寸选择应保证各面距离天线体的距离大于等于四分之一波长，且长方体材料为真空（Vacuum）。

#### 1. 创建长方体空气腔

在主菜单栏中选择“Draw→Box”命令，或者在工具栏中单击快捷按钮，命令执行后进入创建长方体模型状态。在三维模型显示窗口中任意依次点选三个坐标点创建一个任意大小的长方体，在弹出的长方体“属性”对话框中进行编辑和修改，具体操作如下。

在“Command”选项卡中，在“Position”项对应的“Value”栏中输入长方体起始点坐标  $(-\lambda/4, -dR-\lambda/4, -LR/2-\lambda/4)$ ，在“XSize”、“YSize”和“ZSize”项对应的“Value”栏处分别输入长方体的长、宽和高尺寸  $\lambda/2$ 、 $dR+d1+d2+d3+\lambda/2$  及  $LR+\lambda/2$ 。

在“Attribute”选项卡中，在“Name”项对应的“Value”栏中将 Box1 改为 air；由于建模开始前指定了默认模型材料属性为铝（aluminum），所以在“Material”项中需要修改长方体的材料属性，在对应的“Value”栏中单击“aluminum”按钮，在弹出的材料库窗口中，选择长方体材料属性为真空（vacuum）；在透明度“Transparent”项对应的“Value”栏中单击按钮，调整弹出的滑动条值为 0.8，即将长方体模型的透明度设置为 0.8，以方

便查看内部结构。修改编辑后的长方体“属性”对话框的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡如图 7-28 所示。

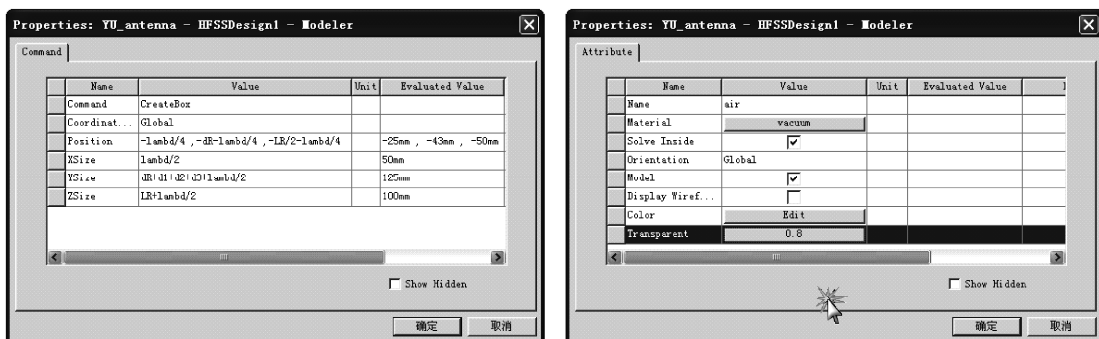


图 7-28 长方体“属性”对话框中的“Command”和“Attribute”选项卡

按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，如图 7-29 所示。

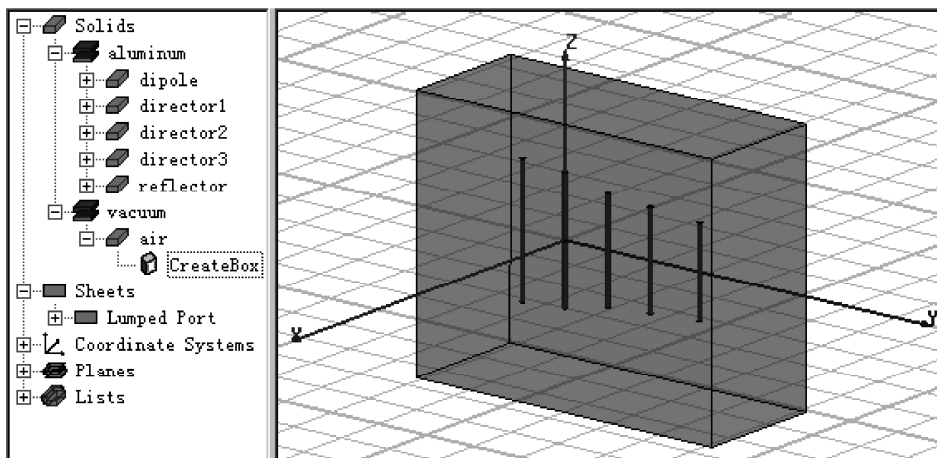


图 7-29 创建长方体后的仿真模型

## 2. 设置辐射边界条件

选中刚刚创建的长方体模型 air，然后在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign boundary→Radiation”命令，打开“Radiation Boundary”对话框，所有设置选取为默认，单击“OK”按钮确定，HFSS 将自动为长方体的每一个面赋予辐射边界条件，设置的辐射边界条件将自动添加到工程管理窗口中的“Boundary”节点下。可以单击 Rad1 的名称来查看辐射边界，如图 7-30 所示。

至此，八木天线的仿真模型部分就全部完成了。按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。



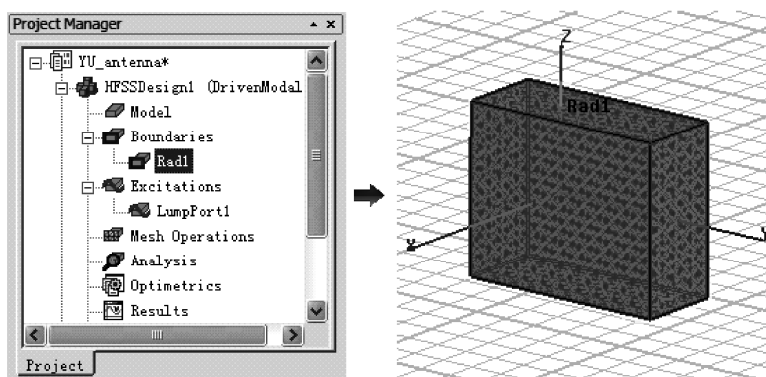



图 7-30 查看辐射边界条件

## 7.7 仿真的基本设置

### 7.7.1 求解设置

本章设计的八木天线工作的中心频率为 3GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 3GHz。具体操作步骤如下所示。

(1) 在工程管理树的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 7-31 所示的“Solution Setup（求解设置）”对话框。

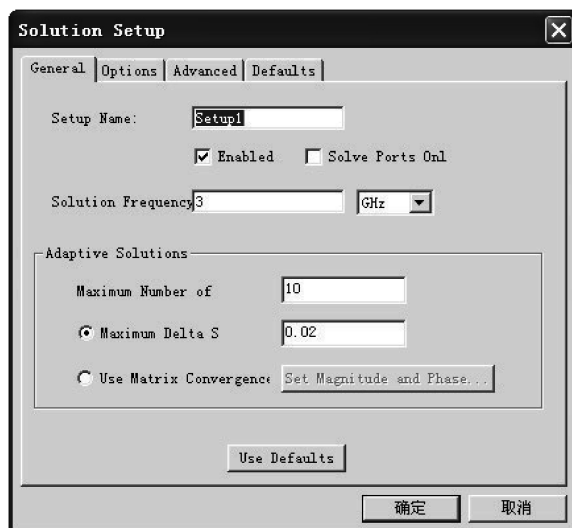


图 7-31 “Solution Setup（求解设置）”对话框

(2) 在“Solution Setup（求解设置）”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项处输入 3GHz；最大求解迭代次




数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02；其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并被自动添加到工程管理树的“Analysis”节点下。

## 7.7.2 扫频设置

为了了解天线在中心频点附近的工作情况，还需要添加一个 2.5~3.5GHz 的扫频设置，用以分析天线在此频段内的电压驻波比等参数。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 7-32 所示的“Edit Sweep（扫频设置）”对话框。

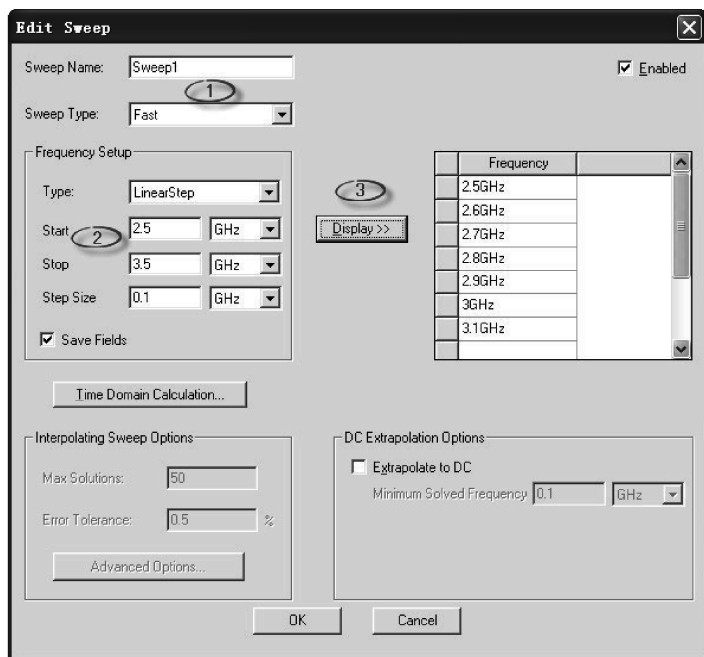


图 7-32 “Edit Sweep（扫频设置）”对话框

(2) 在“Edit Sweep（扫频设置）”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择快速扫频 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率设为 2.5GHz，终止频率设为 3.5GHz，步进长度设为 0.1GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，则在右侧的频率列表中便会显示出扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下，如图 7-33 所示。

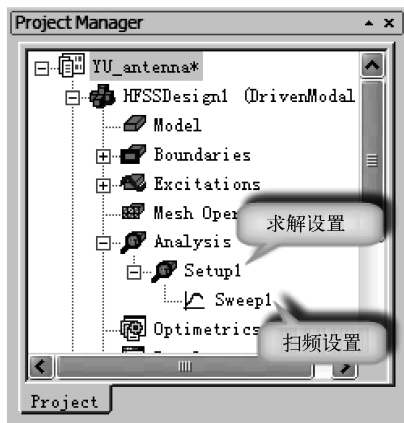





图 7-33 求解的相关设置

### 7.7.3 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了。一般在进行正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出验证结果报告窗口，如图 7-34 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的，如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

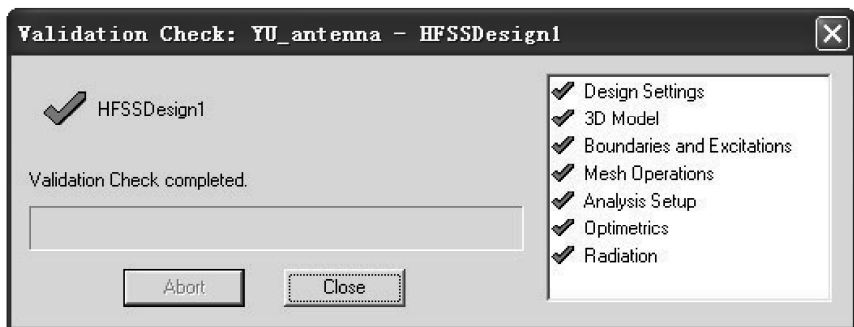



图 7-34 验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树的“Analysis”节点下的求解设置项“Setup1”上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 7-35 所示。

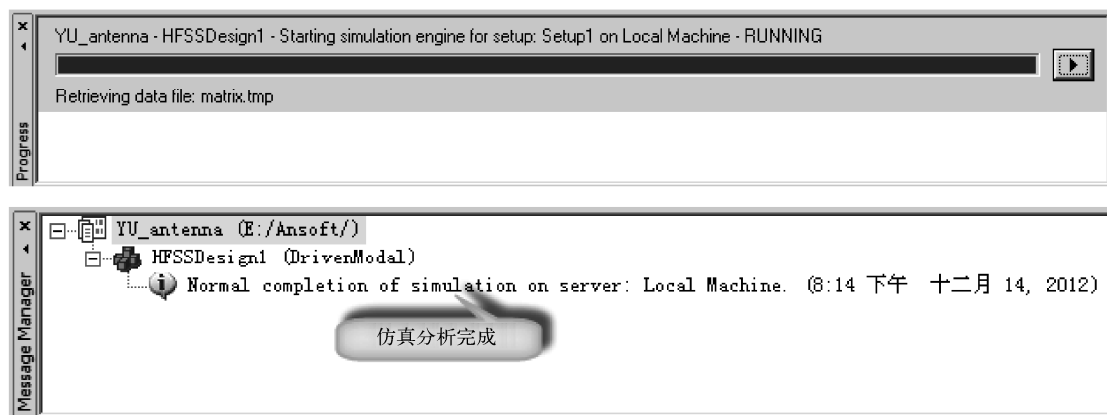


图 7-35 进程窗口和信息管理窗口

## 7.8 查看仿真分析结果

### 7.8.1 查看计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 7-36 所示，打开如图 7-37 左图所示的“Solutions”对话框，然后点选切换至“Convergence”选项卡，并在显示方式“View”项分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

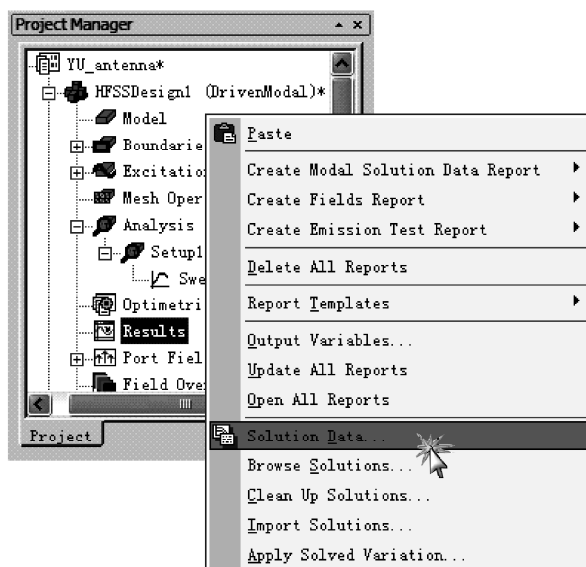


图 7-36 选择查看求解数据命令

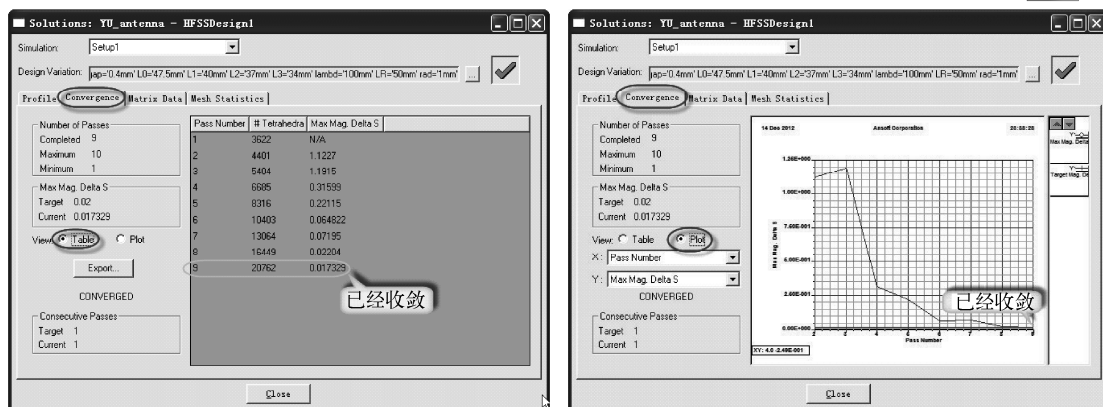


图 7-37 迭代收敛情况图表报告

如图 7-37 右图所示, 求解计算在迭代到第 9 次时达到了收敛要求, 因此其后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后, 求解还没有收敛, 则需要进一步增加迭代次数继续进行计算, 直到收敛为止。

## 7.8.2 查看天线的频带特性

天线的频带特性可以通过查看激励端口 S11 的扫频分析结果和电压驻波比来得到。首先用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令, 打开如图 7-38 所示的“Report”对话框。

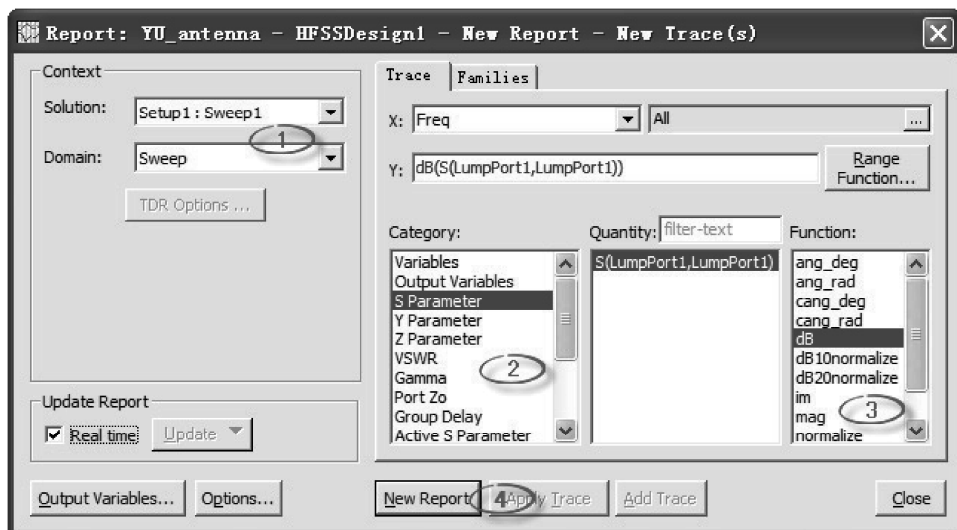


图 7-38 “Report”对话框

在“Report”对话框的“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter, 在“Function”栏中选择 dB, 然后单击“New Report”按钮生成 S11 扫频报告图形, 再单击“Close”按钮关



闭窗口，生成的图形如图 7-39 所示。

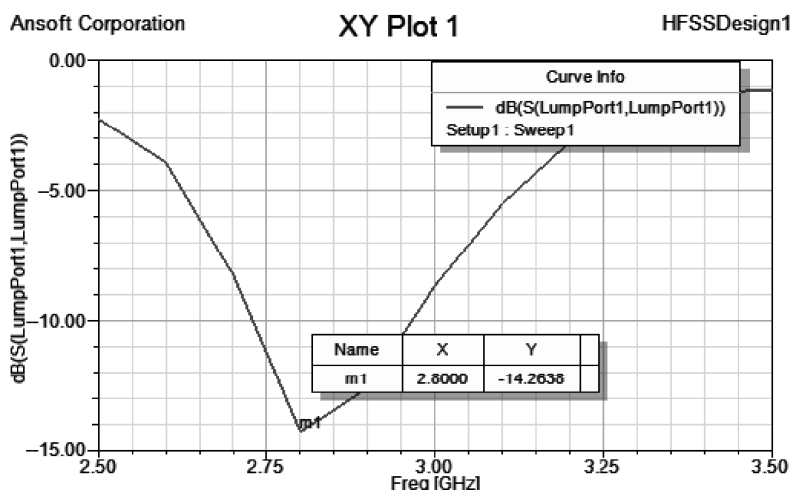



图 7-39 天线的 S11 参数的扫频曲线

在图形结果窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Marker→Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，标注出  $S_{11}$  曲线的最小值点。从图 7-39 中可以看出，当频率为 2.8GHz 时， $S_{11}$  最小，其最小值为 -14.8dB。

重复以上步骤，不同的是在“Category”栏中选择参数类型为 VSWR，在“Function”栏中选择 <none>，然后单击“New Report”按钮生成电压驻波比（VSWR）扫频报告图形，再单击“Close”按钮关闭窗口，同样标注出最小值点及 3GHz 处的驻波比，生成的图形如图 7-40 所示。

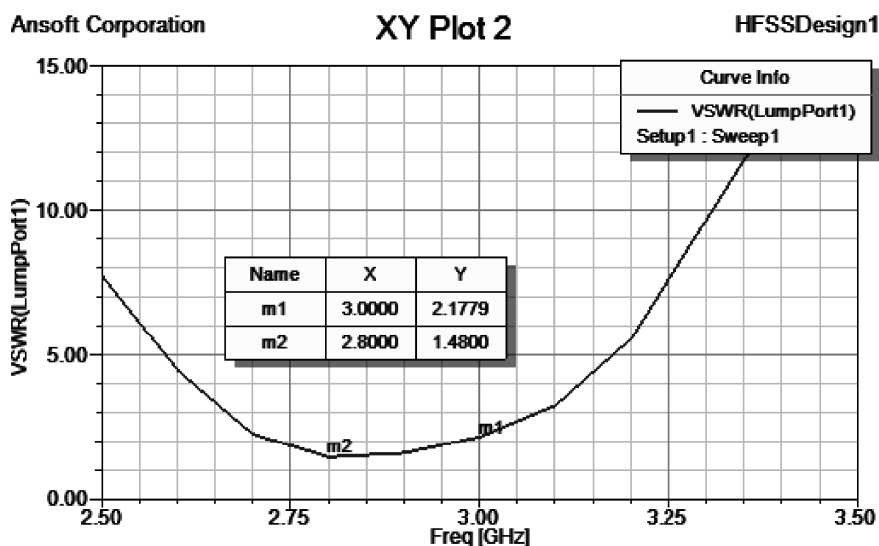


图 7-40 电压驻波比曲线

## 7.9 优化设计

由图 7-39 所示的天线的 S11 参数的扫频曲线可见，八木天线的谐振点位于 2.8GHz 处，这与我们期望的中心工作频率 3GHz 还存在一定的差距，因此还需要对设计进行优化，以达到天线谐振频率为 3GHz 的要求。

根据八木天线的原理和经验分析，八木天线的谐振频率由有源振子的长度  $L_0$  决定，同时反射器距离有源振子的距离  $dR$  也对天线频带特性有所影响，因此，在进行优化之前，首先要对这两个参数进行扫描分析，得到其对天线谐振频率的影响关系，然后有针对性地进行优化设计。

### 7.9.1 参数扫描分析

为了便于进行参数扫描，首先对相关的设计变量  $dR$  和  $L_0$  进行调整。在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，打开设计变量的“Properties”对话框，选中变量  $dR$ ，将其对应的“Value”栏中的“0.18\*lambda”改为与其等值的 18mm，再选中变量  $L_0$ ，将其对应的“Value”栏中的“0.475\*lambda”改为与其等值的 47.5mm，如图 7-41 所示。修改完成后，就可以对变量  $dR$  和  $L_0$  进行参数扫描分析了。

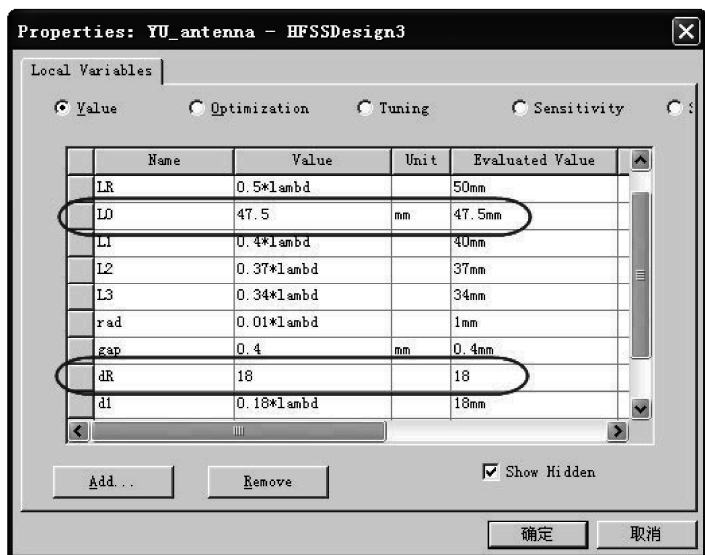


图 7-41 对设计变量  $dR$  进行修改

#### 1. 对变量 $dR$ 进行扫描分析

首先添加一个参数扫描分析。

(1) 在工程管理树中的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add→Parametric”命令，弹出“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框，如图 7-42 所示。

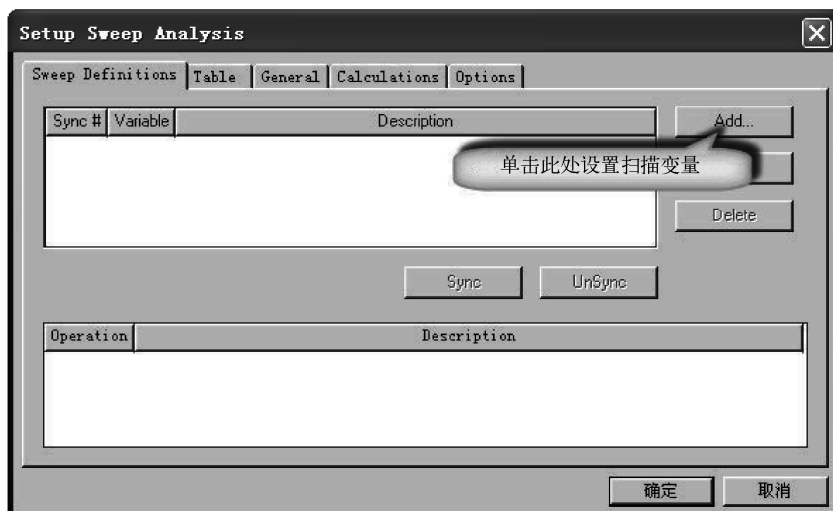


图 7-42 “Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框

(2) 单击“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框右上角的“Add...”按钮，打开“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框，设置扫描变量。

(3) 在“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框的“Variable”项对应的下拉菜单中选择变量 dR，并设置变量的起始值为 17mm，终止值为 23mm，步长为 1mm，编辑完成后单击中间的“Add>>”按钮，将其添加到右侧的变量列表中，设置后的对话框如图 7-43 所示，单击“OK”按钮完成操作，返回上一级对话框。

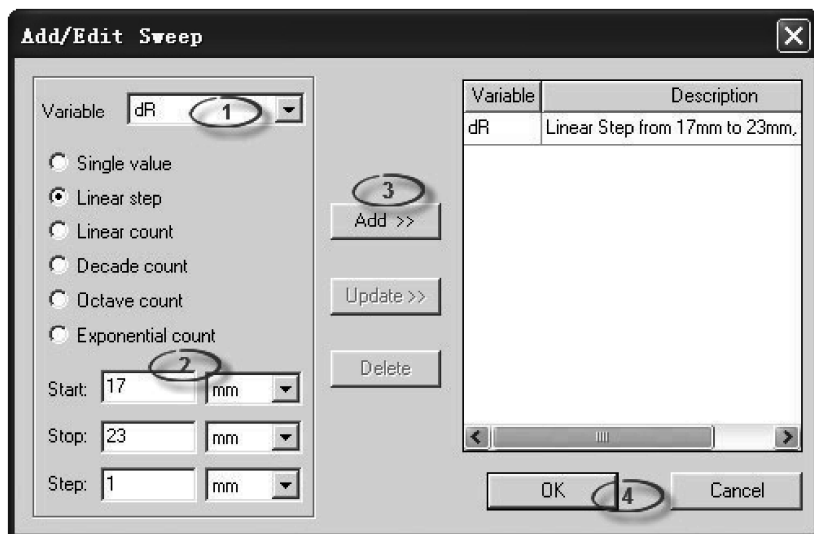


图 7-43 设置扫描分析变量 dR

(4) 回到“扫描分析设置”对话框后，会看到刚刚设置的扫描变量已经添加到了变量列表中，保持其他选项卡设置不变，单击对话框中的“确定”按钮完成扫描分析设置。操作完





成后, 名为 ParametricSetup1 的参数扫描分析会自动添加到工程管理树中的“Optimetrics”节点下。

(5) 执行参数扫描分析。在工程管理树中找到添加的扫描分析 ParametricSetup1, 选中它并单击鼠标右键, 在打开的快捷菜单中选择“Analyze”命令, 则变量  $dR$  的扫描分析便开始运行。

(6) 查看分析结果。分析完成后, 用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在打开的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令, 打开“Report”对话框, 选择查看  $S_{11}$  参数, 并确认与图中一致的设置, 再单击“New Report”按钮, 绘制参数扫描扫频曲线, 最后单击“Close”按钮关闭对话框, 绘制的曲线如图 7-44 所示。

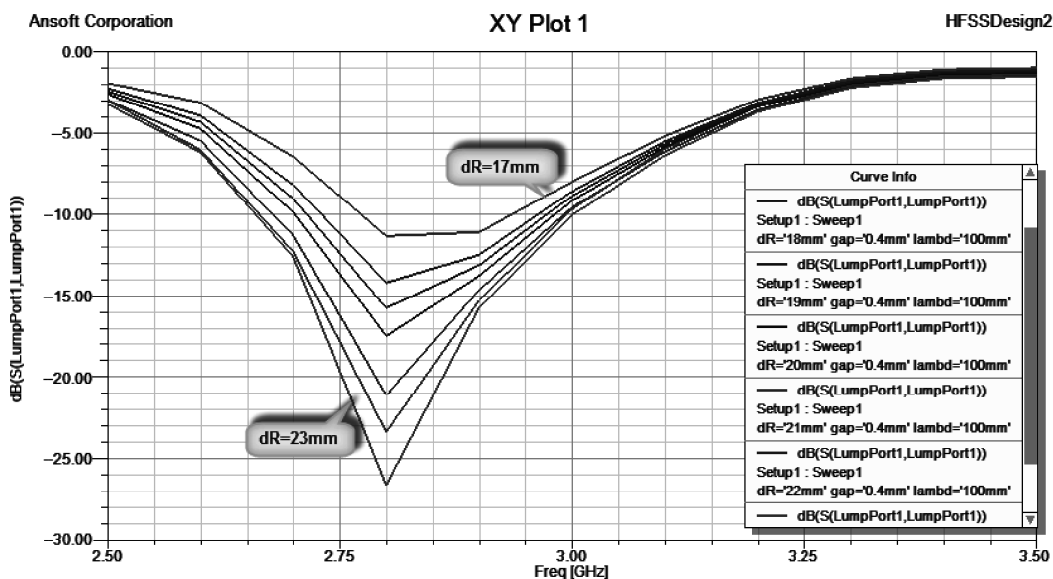


图 7-44 不同  $dR$  值时对应的  $S_{11}$  扫频曲线

从图 7-44 中可以看到, 当其他变量固定时, 反射器与有源振子两者的间距  $dR$  对天线谐振频率的影响不大。

## 2. 对变量 $L0$ 进行扫描分析

(1) 在工程管理树中的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Add→Parametric”命令, 弹出“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框。

(2) 单击“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框右上角的“Add...”按钮, 打开“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框, 设置扫描变量。

(3) 在“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框的“Valuable”项对应的下拉菜单中选择变量  $L0$ , 并设置变量的起始值为 42.5mm, 终止值为 46.5mm, 步长为 0.5mm, 编辑完成后单击中间的“Add>>”按钮, 将其添加到右侧的变量列表中, 设置后的对话框如图 7-45 所示, 单击“OK”按钮完成操作, 返回上一级对话框。



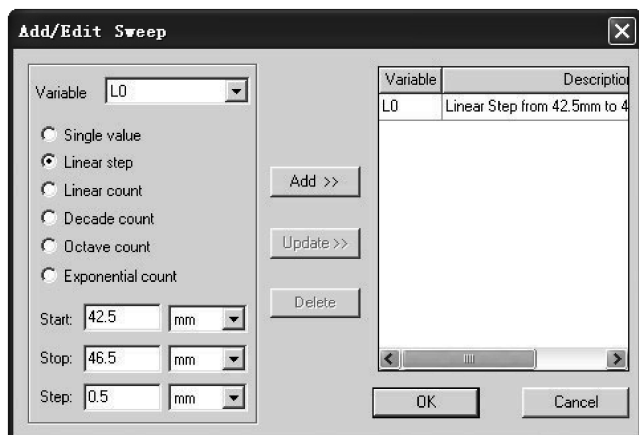
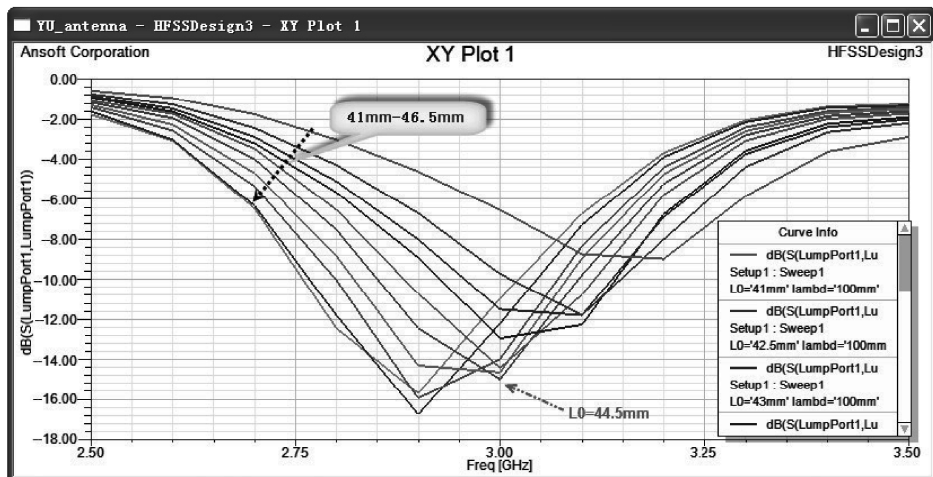


图 7-45 设置扫描分析变量 L0

(4) 回到“扫描分析设置”对话框后，会看到刚刚设置的扫描变量已经添加到了变量列表中，保持其他选项卡设置不变，单击对话框中的“确定”按钮完成扫描分析设置。操作完成后，名为 ParametricSetup2 的参数扫描分析会自动添加到工程管理树中的“Optimetrics”节点下。

(5) 执行参数扫描分析。在工程管理树中找到添加的扫描分析 ParametricSetup2，选中它并单击鼠标右键，在打开的快捷菜单中选择“Analyze”命令，运行扫描分析。

(6) 查看分析结果。分析完成后，用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在打开的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，选择查看  $S_{11}$  参数，并确认与图中一致的设置，然后切换至“Families”选项卡，在变量列表中指定变量 L0 范围为 All，变量 dR 值为 18mm，单击“New Report”按钮，绘制参数扫描扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭对话框。绘制的曲线如图 7-46 所示。

图 7-46 变量 L0 不同值时对应的  $S_{11}$  扫频曲线

从图 7-46 中可以看到, 天线谐振频率随有源振子长度的增加而降低。当  $L_0=44.5\text{mm}$  时, 谐振频率约为  $3\text{GHz}$ 。

## 7.9.2 优化设计

通过 7.9.1 节中的参数扫描分析, 我们知道天线谐振频率与有源振子的长度密切相关, 并且当  $L_0=44.5\text{mm}$  时, 谐振在  $3\text{GHz}$  附近, 这样在进行优化设计时, 只需对参数  $L_0$  在  $44.5\text{mm}$  附近进行优化即可。具体步骤如下。

### 1. 指定优化变量

选择主菜单栏中的“HFSS→Design Properties”命令, 打开设计变量列表, 选择“Optimization”选项, 在其中的变量列表中勾选变量  $L_0$  对应的“Include”栏, 并输入变量最小值“Min”为 43.5, 最大值“Max”为 45, 如图 7-47 所示, 单击“确定”按钮完成操作, 这样就将  $L_0$  指定为优化变量了, 其优化范围为  $43.5\sim 45\text{mm}$ 。

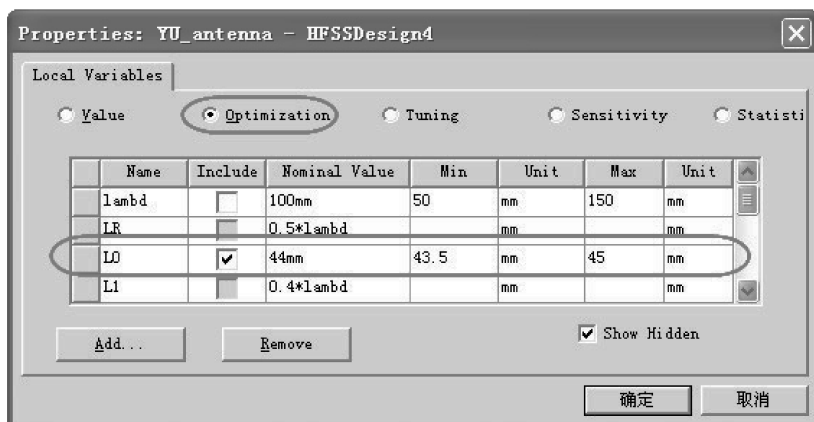


图 7-47 指定优化变量

### 2. 添加优化设置

在工程管理树的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Add→Optimization”命令, 弹出“Setup Optimization (优化设置)”对话框。在该对话框的“Goals”选项卡下进行选择和设置: 在“Optimizer”项选择 Sequential Nonlinear Programming; 在“Max No.of Iterations”项输入 20, 然后单击对话框左下角的“Setup Calculation”按钮, 在弹出的“Add/Edit Calculation (添加/编辑计算式)”对话框中进行如图 7-48 所示的设置。

设置完成后, 单击对话框下面的“Add Calculation”按钮添加  $S_{11}$  为优化目标函数, 再单击“Done”按钮返回“Setup Optimization (优化设置)”对话框, 可以看到目标函数已经添加到 Cost 列表中。单击目标函数对应的“Condition”列, 在其对应的下拉菜单中选择“Minimize”, 最后得到的“Setup Optimization (优化设置)”对话框的“Goals”选项卡如图 7-49 所示。

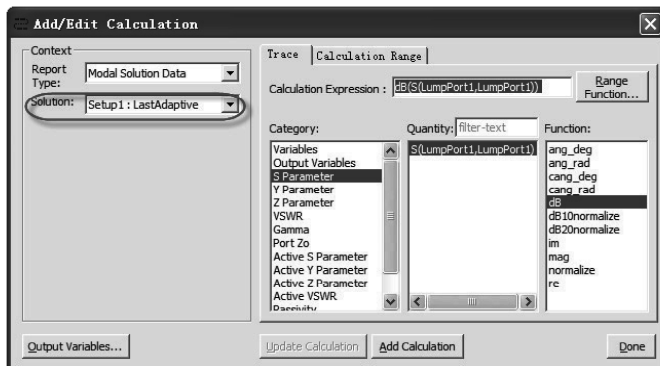


图 7-48 “Add/Edit Calculation (添加/编辑计算式)”对话框

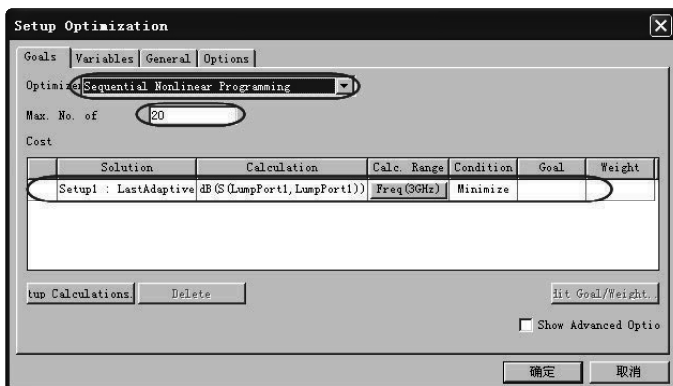


图 7-49 “Goals”选项卡

单击切换至“Variables”选项卡，在 L0 对应的“Starting Value”栏中输入 44.5，然后单击“<<Advanced”按钮，则新增两项内容，再分别在“Min Focus”栏和“Max Focus”栏中输入 43.6 和 44.8，如图 7-50 所示。

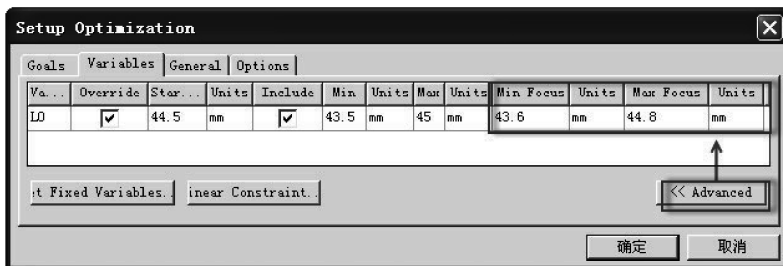


图 7-50 “Variables”选项卡

### 3. 进行优化设计

优化设置完成后，一个名为 OptimizationSetup1 的优化设置项会自动添加到工程管理窗口的“Optimetrics”节点下。选中该项并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，开始进行优化设计。



#### 4. 查看优化结果

优化过程需要一段时间。当所有的分析计算结束后，在工程管理树窗口单击优化设置项 OptimizationSetup1，打开右键快捷菜单，选择其中的“View Analysis Result”命令，弹出“Post Analysis Display”对话框，选择“Table”单选按钮，以数据列表的形式查看优化结果，如图 7-51 所示。

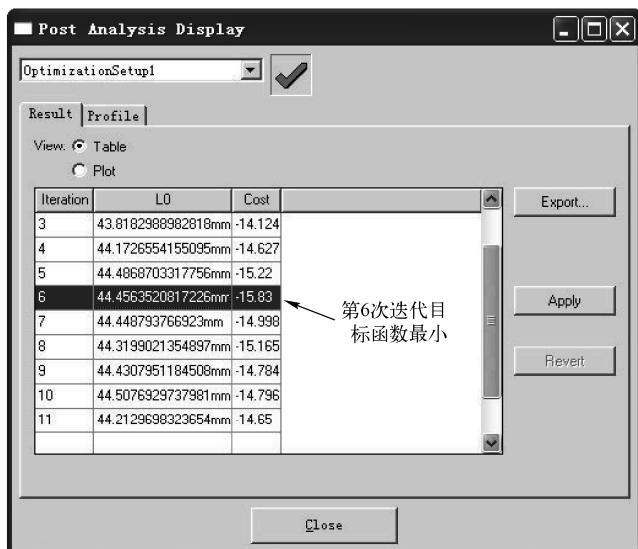


图 7-51 优化分析结果数据


由图 7-51 可见，HFSS 优化设计一共进行了 20 次的迭代计算，其中第 6 次迭代计算的目标函数 S11 的数值最小，为 15.83，此时对应的变量 L0 的值约为 44.456mm。

### 7.10 应用并查看优化后的天线指标

下面就可以应用 7.9 节的优化数据，重新分析计算仿真模型了。打开设计变量列表，将变量 dR 设为 18mm，变量 L0 设为 44.456mm，设置完成后选择工程管理树中的“Analysis”节点下的“Setup1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，进行仿真计算。分析计算完成后，再查看仿真数据结果。

#### 7.10.1 天线的 $S_{11}$ 参数

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，在“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成  $S_{11}$  的扫频图形报告，再单击“Close”按钮关闭对话框，生成的图形如图 7-52 所示。

在生成的图形报告窗口中单击鼠标右键，选择“Marker → Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮 ，标注出 S11 曲线的最小值点。由图 7-52 可见，S11 的最小值位于 3GHz 处，最小值为 -15.8dB，实现了天线在 3GHz 时的谐振。



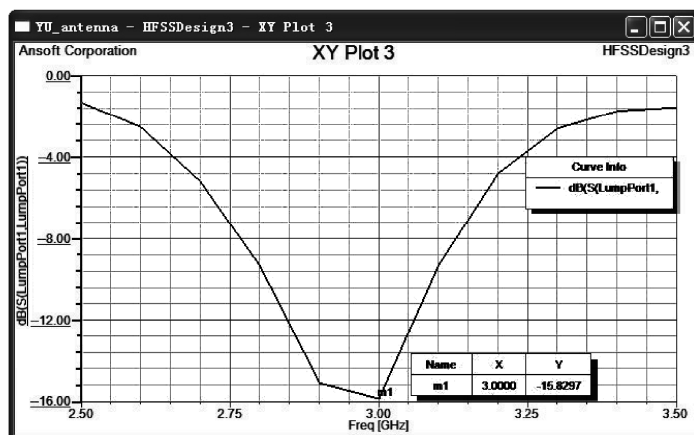


图 7-52 天线的  $S_{11}$  参数扫频曲线

## 7.10.2 天线的三维增益方向图

### 1. 定义远场辐射球面

(1) 单击“HFSS→Radiation→Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令，弹出“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框，或者在工程管理树中点选“Radiation”节点，打开右键快捷菜单，选择其中的“Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令来打开该对话框，如图 7-53 所示。

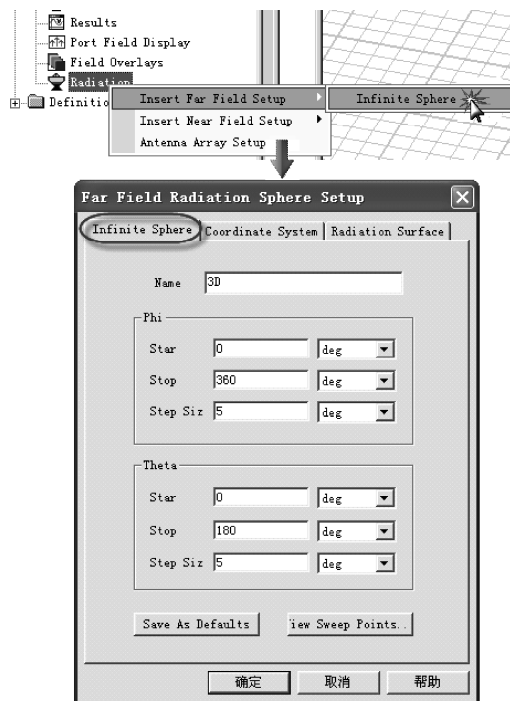


图 7-53 打开“远场辐射球面设置”对话框

(2) 在“远场辐射球面设置”对话框的“Infinite Sphere”选项卡中，在“Name”文本框中输入新建辐射球面的名称 3D，以便在绘制远场三维方向图时选择该远场辐射球面。

(3) 指定辐射球面的计算角度范围。角度  $\theta$  的起始角度为 0deg，终止角度为 360deg，角度步长为 5deg；角度  $\varphi$  的起始角度为 0deg，终止角度为 180deg，角度步长为 5deg。设置时角度范围必须在  $-360^\circ \sim 360^\circ$  之间。单位既可以取度，也可以取弧度，HFSS 默认的单位为度。

(4) 其他选项卡的内容保持默认设置。单击“确定”按钮完成操作，定义的远程辐射球面 3D 会自动添加到工程管理树中的“Radiation”节点下。

## 2. 绘制三维增益方向图

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→3D Polar Plot”命令，打开如图 7-54 所示的“Report”对话框，确保“Geometry”项选择的是“3D”，再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain，在“Quantity”栏中选择 GainTotal，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成天线三维远场增益方向图，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

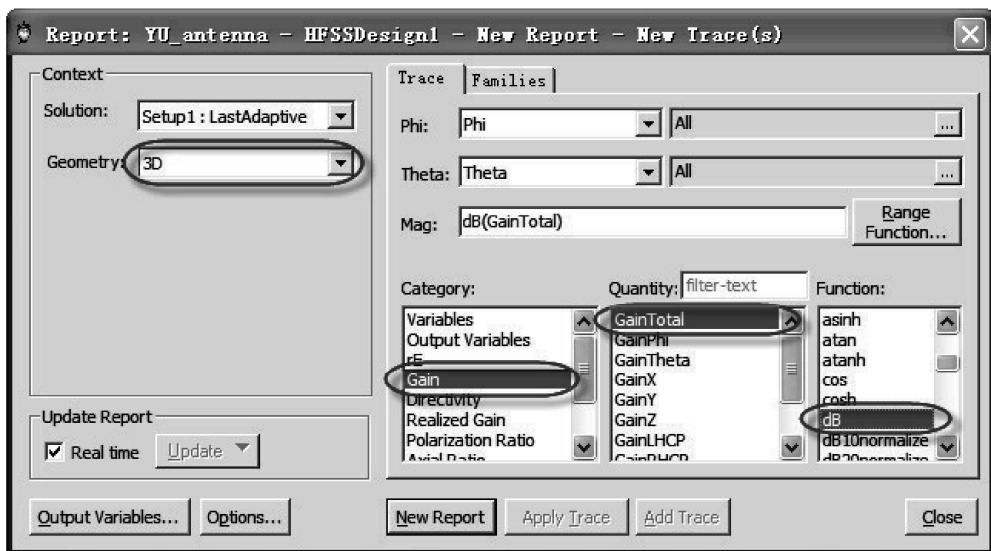


图 7-54 “Report”对话框

绘制的三维远场辐射增益方向图如图 7-55 所示。从图 7-55 中可以看出本章设计的八木天线的最大辐射方向指向 Y 轴正方向，这也与引向器的方向一致，且前向辐射比后向辐射大许多，这些都说明了天线的反射器和引向器发挥了正常的作用。最大辐射增益为 9.3dB 左右。

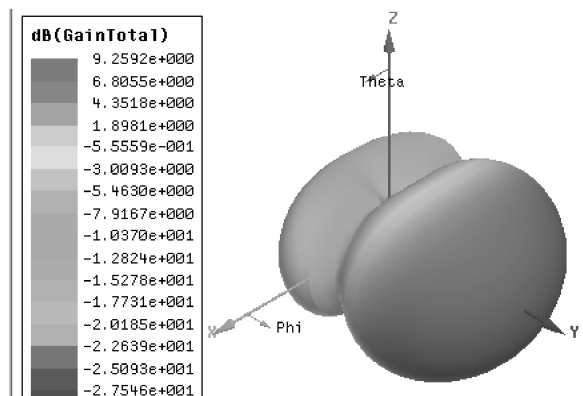


图 7-55 三维远场辐射增益方向图

### 7.10.3 天线的二维增益方向图

以查看 YOZ 平面的方向图为例，首先定义远场辐射平面，其操作与定义远场辐射球面的操作一样，不同的是计算角度范围为：角度  $\theta$  的起始角度为 90deg，终止角度为 90deg，角度步长为 90deg；角度  $\varphi$  的起始角度为 -180deg，终止角度为 180deg，角度步长为 1deg，如图 7-56 所示。

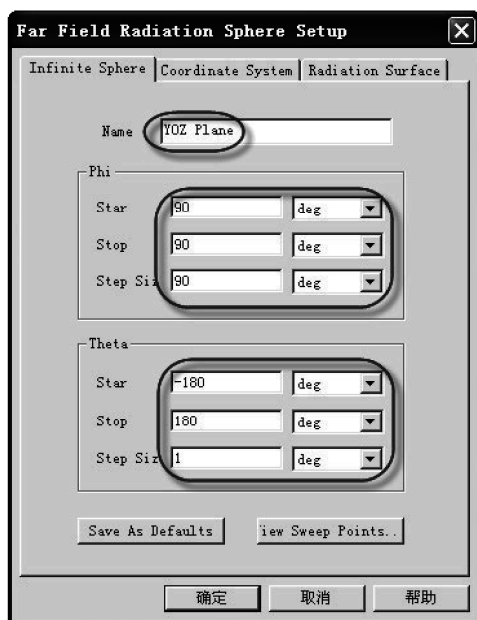


图 7-56 “远场辐射球面设置”对话框

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键，在打开的菜单中选择“Create Far Fields Report→Radiation Pattern”命令，打开如图 7-57 所示的“Report”对话框，确保



“Geometry”项选择的是“YOZ Plane”，再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain，在“Quantity”栏中选择 GainTotal，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成 YOZ 平面上的天线二维辐射增益方向图，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

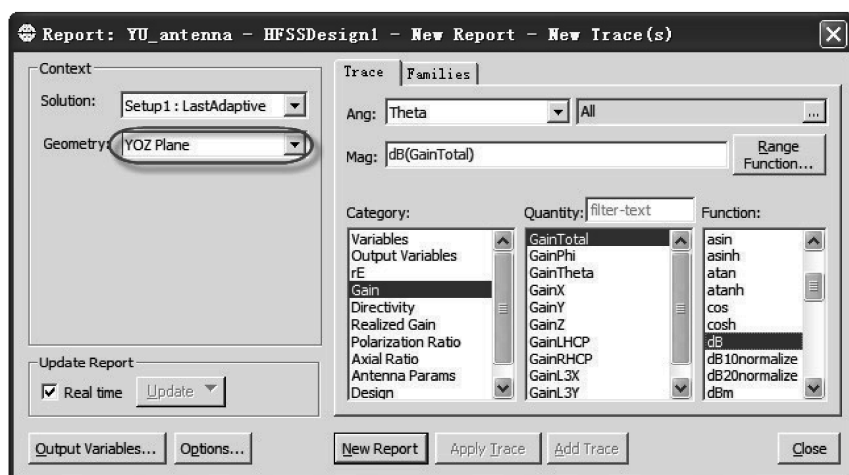



图 7-57 “Report”对话框

单击工具栏中的快捷命令按钮，分别标注出正前方与正后方的数值，绘制的二维辐射增益方向图如图 7-58 所示。

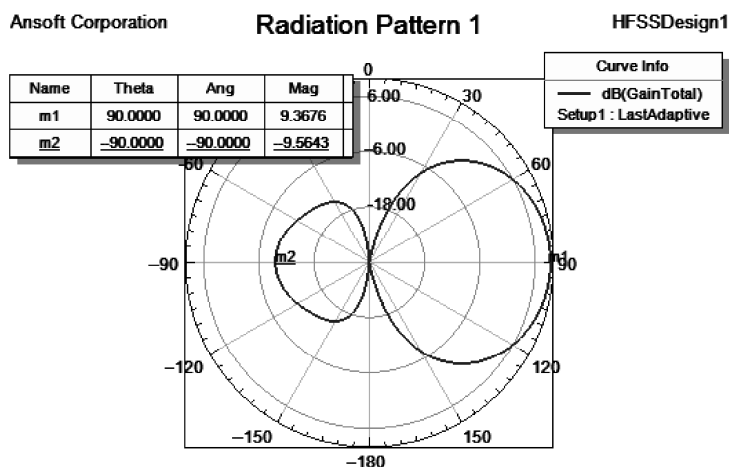


图 7-58 YOZ 平面的二维辐射增益方向图

#### 7.10.4 天线参数列表

(1) 在工程管理窗口的“Radiation”节点中找到定义的远场辐射球面 3D 的名称，选中它并打开鼠标右键的快捷菜单，选择菜单中的“Compute Antenna Parameters...”命令，命令执行后会弹出如图 7-59 所示的“Antenna Parameters (天线参数)”对话框。

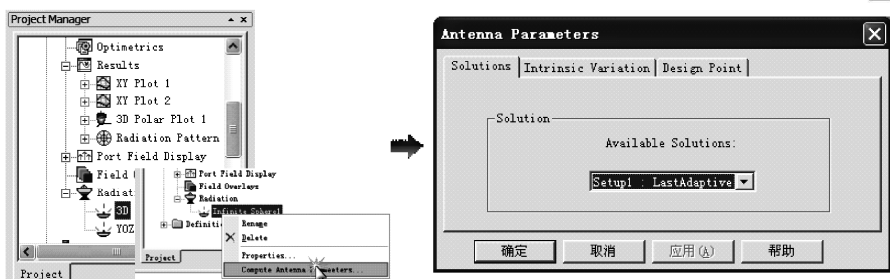


图 7-59 打开“Antenna Parameters（天线参数）”对话框

(2) 在“Antenna Parameters（天线参数）”对话框中的“Solution”选项卡设置天线参数计算的求解项为 Setup1: LastAdaptive；切换到“Intrinsic Variation”选项卡，选择天线参数计算频率为 GHz，然后单击“确定”按钮完成设置，会得到如图 7-60 所示的天线参数计算结果及最大远场数据列表。

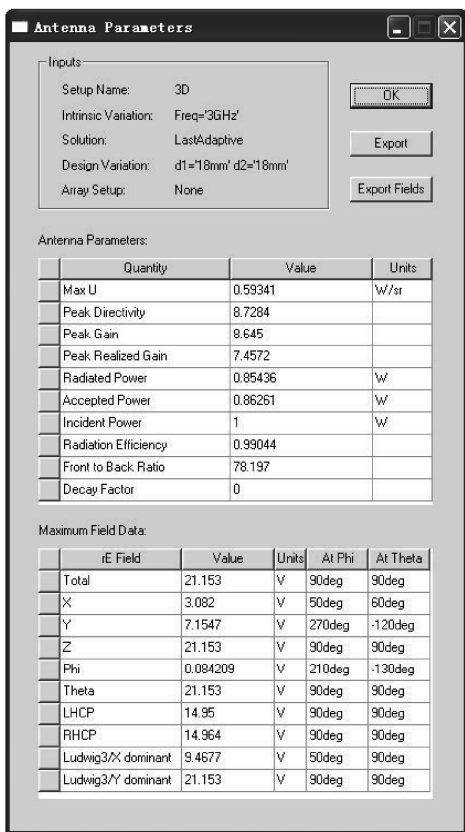


图 7-60 天线参数计算结果及最大远场数据列表

本章创建了一个五单元的八木天线模型，并对其进行了仿真分析，查看了与天线相关的各项性能参数。通过本章的介绍，可使读者进一步了解八木天线的设计思路，以及 HFSS 仿真设计的相关操作和技巧。如果天线指标参数不尽理想，读者可以通过使用参数优化设计的方法进一步对天线尺寸进行优化，最后保存仿真设计并退出 HFSS。

## 第8章 微波混合接头仿真实例

微波混合接头是用来分配或合成微波信号功率并具有隔离性能的四端口微波元件。混合接头有魔 T 和环形电桥两种形式，本章为读者介绍魔 T 的工作原理、设计方法和 HFSS 仿真实现。

### 8.1 魔 T 的结构形式及特性

将具有共同对称面的 E-T 接头和 H-T 接头合并起来，就构成了双 T 接头，又称魔 T，如图 8-1 所示。

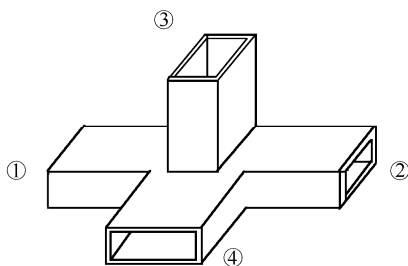


图 8-1 魔 T 的结构示意图

魔 T 由四个波导臂构成，如图 8-1 所示，一般把端口③称为魔 T 的 H 臂或和臂，把端口④称为魔 T 的 E 臂或差臂。根据 E-T 和 H-T 的接头特性，可知魔 T 具有以下特性：

- (1) 四个端口完全匹配；
- (2) 当信号由 E 臂的③端口输入时，①和②端口等幅反向输出，H 臂的④端口输出为零；
- (3) 当信号由 H 臂的④端口输入时，①和②端口等幅同向输出，E 臂的③端口输出为零；
- (4) 当端口①或②为单端口输入时，端口③和④等分输出，而另一个非输入端口②或①的输出为零；

(5) 当端口①和②同时输入信号时，端口③输出两信号和的  $1/\sqrt{2}$  倍，端口④输出两信号差的  $1/\sqrt{2}$  倍。

根据以上分析，魔 T 的各散射参数有以下关系：

$$S_{11} = S_{22}, \quad S_{13} = S_{23}, \quad S_{14} = S_{24}, \quad S_{33} = S_{44} = 0, \quad S_{34} = 0$$

假定网络是无耗的，则有  $[S]^+ [S] = [I]$ 。

魔 T 作为可逆无耗四端口网络，其散射矩阵可表示为

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

从总体上讲，魔 T 具有对口隔离、邻口 3dB 耦合及完全匹配的特性。

## 8.2 HFSS 仿真设计概述

本章利用 HFSS 软件仿真设计一个带有锥形匹配结构的波导魔 T，其工作频率在 11.5~13.5GHz 之间的 Ku 频段，中心频点为 12.5GHz。为了消除四个波导臂连接处的不连续性造成的反射，在连接处构造了一个锥形匹配结构，以减小回波损耗。

HFSS 仿真模型示意图如图 8-2 所示，波导臂采用内腔尺寸建模，金属匹配锥体直接嵌入波导中，各端口分别设置与标号一致的波端口激励。

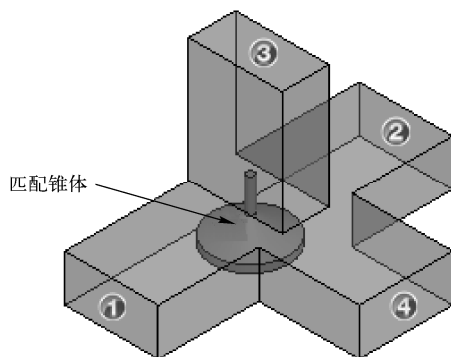


图 8-2 HFSS 仿真模型示意图

魔 T 的具体尺寸结构和对应参数变量如图 8-3 所示。

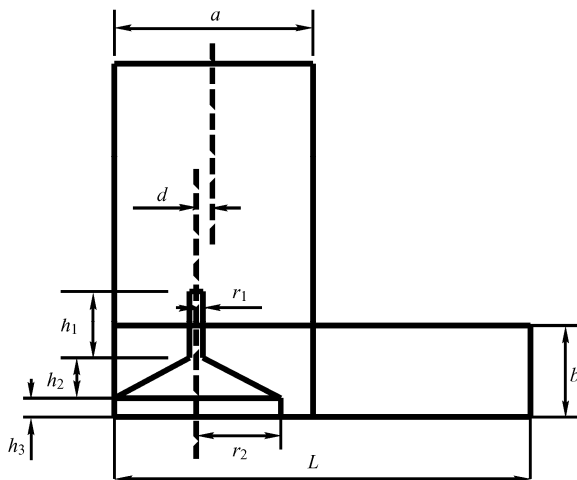


图 8-3 魔 T 的具体尺寸结构和对应参数变量

波导选择标准 BJ120 波导，内口径尺寸为  $a \times b = 19.05\text{mm} \times 9.525\text{mm}$ ；其他参数的初始值如表 8-1 所示。

表 8-1 参数的初始值

变 量	数值 (mm)	变 量	数值 (mm)
$a$	19.05	$h_1$	7
$b$	9.525	$h_2$	3.7
$r_1$	0.8	$h_3$	1.52
$r_2$	7.8	$L$	30
$d$	$a/2-r_2$		

HFSS 仿真的相关设置如下。

- (1) 求解类型：模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位：毫米 (mm)。
- (3) 激励类型：波端口激励。
- (4) 求解及扫频设置：求解频率为 12.5GHz，扫频范围为 11~14GHz。
- (5) 查看仿真结果：匹配特性、隔离特性及平分特性；不同端口输入时的场分布。

下面介绍详细的仿真设计过程。

## 8.3 创建工程设计

### 8.3.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件。当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Model T。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 Magic T.HFSS，如图 8-4 所示。

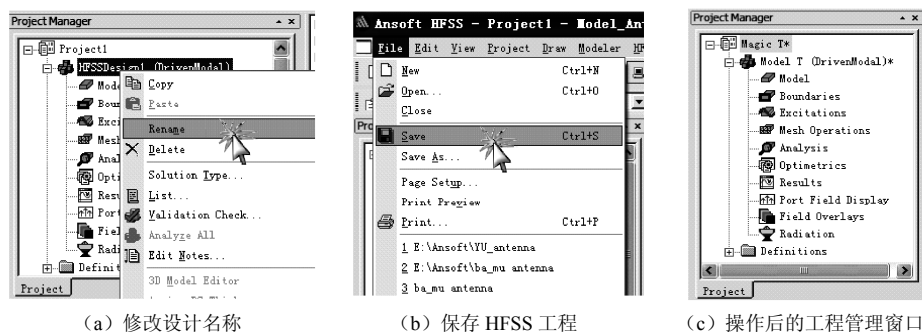


图 8-4 创建并保存新工程

### 8.3.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type...”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 8-5 所示。

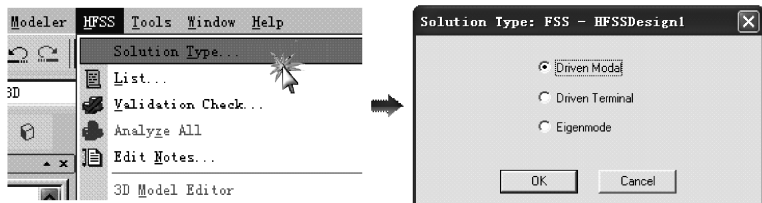


图 8-5 定义“求解类型”

### 8.3.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units...”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”项，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 8-6 所示。

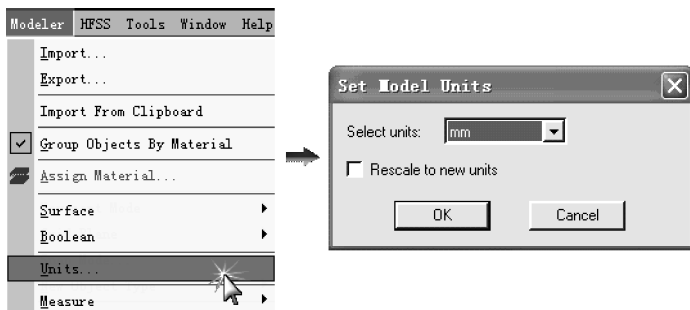


图 8-6 设置模型尺寸单位

### 8.3.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选窗口最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，如图 8-7 所示。

勾选此项是为了在建模操作过程中，创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出模型的“属性”对话框，用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令，分别打开模型“属性”对话框中的

“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

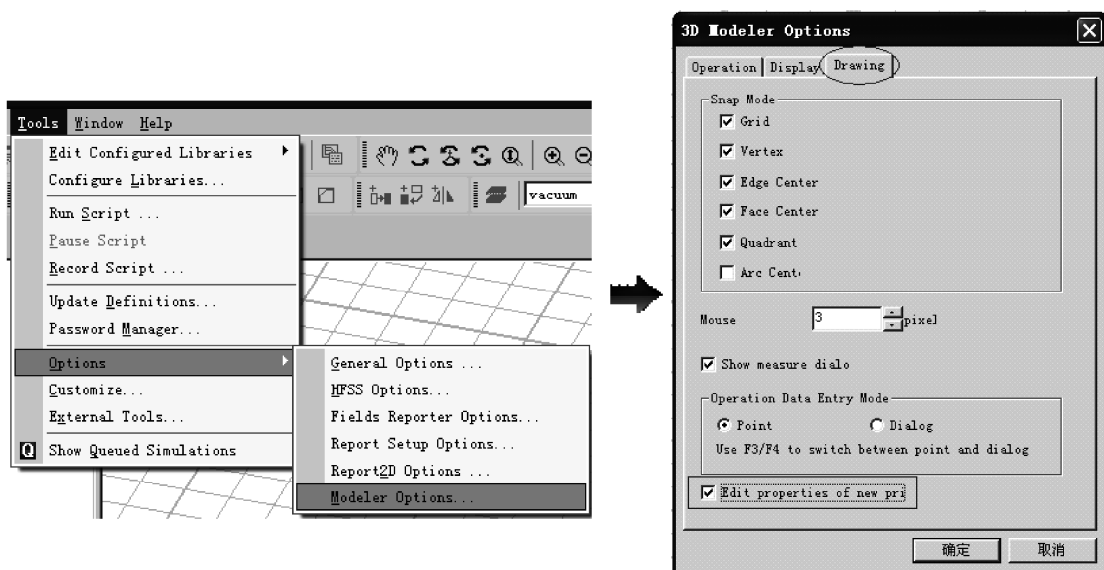


图 8-7 设置“3D Modeler Options”对话框

在主菜单栏中选择“Tools→Options→HFSS Options...”命令，在打开的“HFSS Options”对话框中，在“General”选项卡下勾选“Boundary Options”栏中的“Duplicate boundaries with geometry”复选框，如图 8-8 所示。

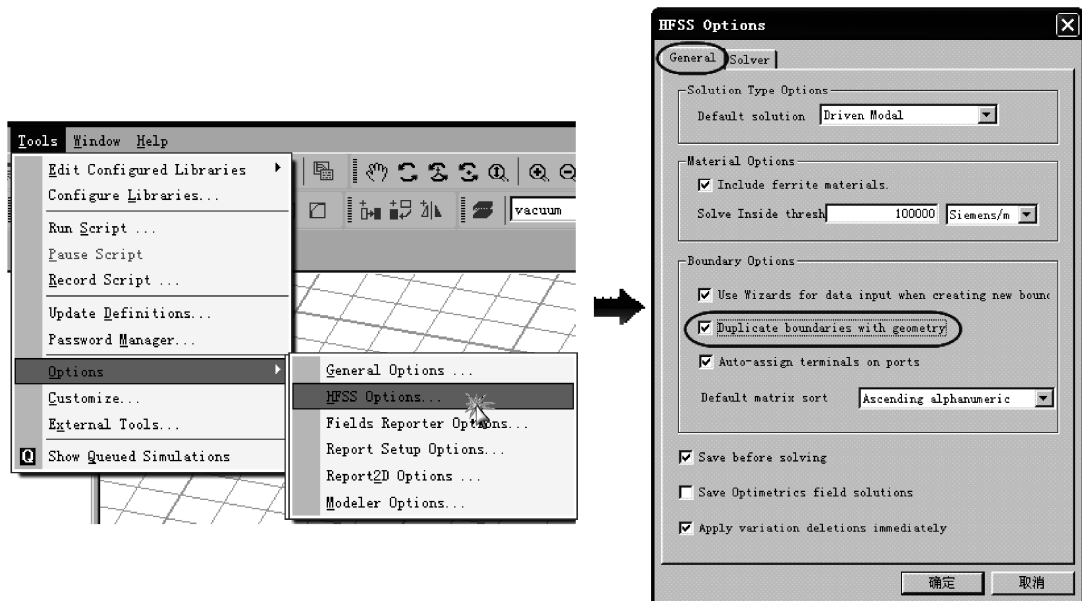


图 8-8 设置“HFSS Options”对话框

勾选此项是为了在后续的建模过程中,进行模型复制命令时,使模型上的端口激励也可以一起被复制过去并生成新的端口,从而节省了重新设置端口的操作。

## 8.4 创建魔 T 的仿真模型

### 8.4.1 定义设计变量

根据图 8-3 定义相关设计变量。

首先定义波导宽边尺寸变量  $a=19.05\text{mm}$ 。然后在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令,在弹出的“设计变量”对话框中单击左下角的“Add...”按钮,在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称 a,在“Value”栏中给变量赋值 19.05mm,单击“OK”按钮完成输入,自动返回上一级对话框,在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 a。变量定义步骤如图 8-9 所示。

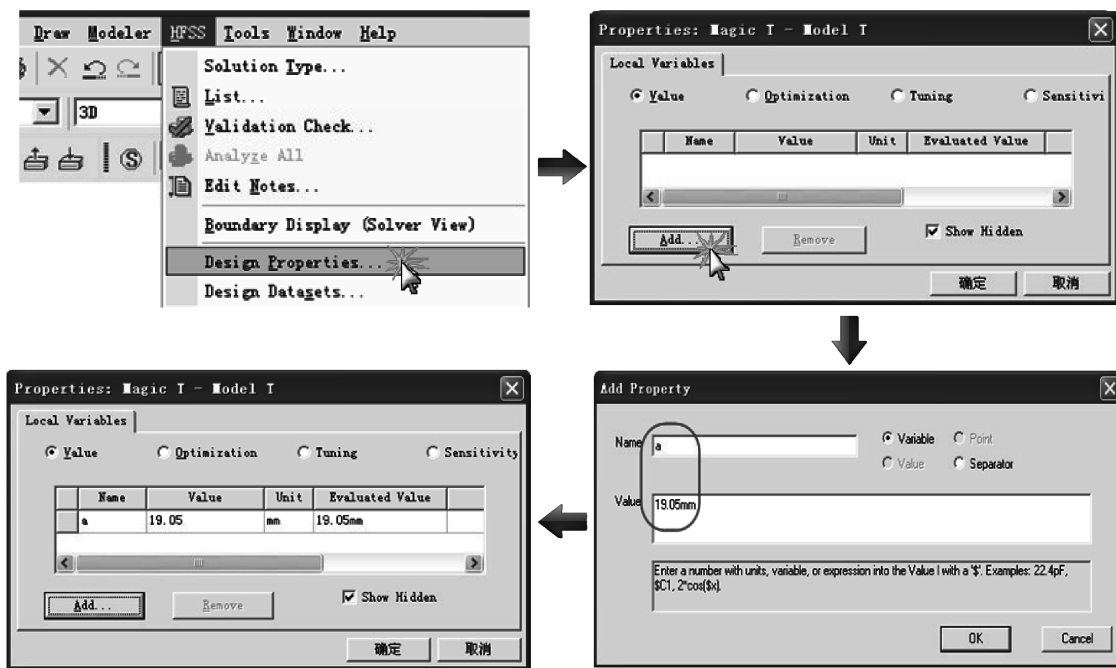


图 8-9 定义设计变量

再次单击左下角的“Add...”按钮,在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称 b,在“Value”栏中给变量赋值 9.525mm,单击“OK”按钮完成输入,自动返回上一级对话框,在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 b。

重复以上步骤添加其他设计变量,添加完成后的设计变量列表如图 8-10 所示,最后单击“确定”按钮完成操作。






图 8-10 设计变量列表

## 8.4.2 创建魔 T 波导臂

### 第一步：创建①端口波导臂

#### 1. 创建任意大小的长方体

选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。如图 8-11 所示，首先在坐标原点单击鼠标左键，指定原点为长方体顶点，然后在 XY 平面拖动出一个任意大小的长方形，单击鼠标左键确定长方体的底面，接下来沿 Z 轴方向移动鼠标，在任意位置单击鼠标左键确定长方体的高度，此时便创建了一个任意大小的长方体模型。

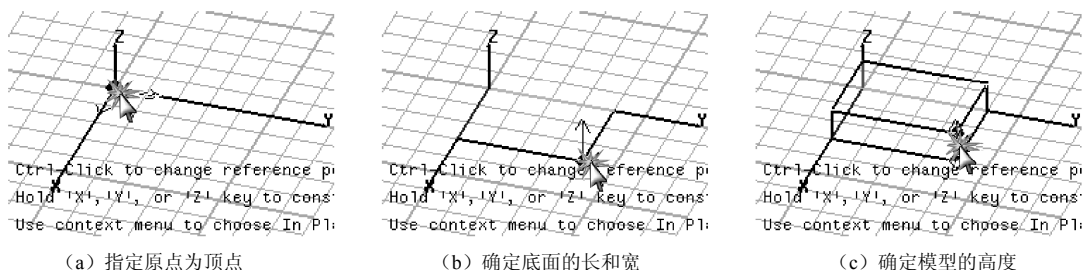


图 8-11 创建任意大小的长方体模型

在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为 $-a/2$ ，0mm， $-b/2$ ；“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 a、-L 和 b；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 T，其他选项保持默认设

置不变, 如图 8-12 所示。

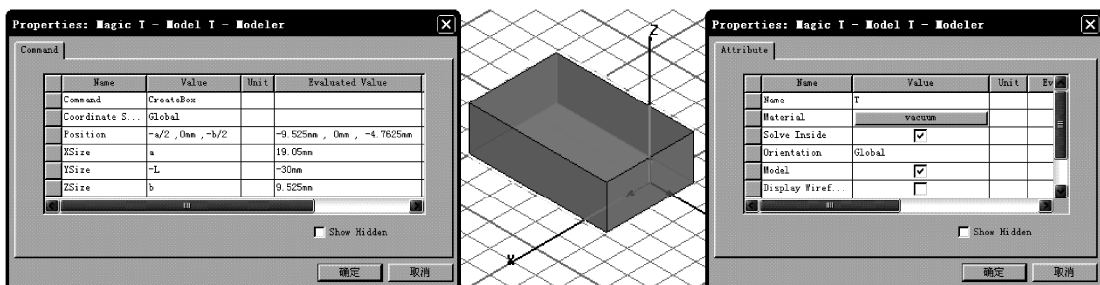


图 8-12 ①端口波导臂及“属性”对话框

编辑完成后单击“确定”按钮结束, 在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的长方体模型 T, 然后按 Ctrl+D 键, 以适当尺寸显示模型。

## 2. 设置波端口激励

首先在显示窗口中单击鼠标右键, 选择“Select Faces”命令, 进入平面选择模式, 再在按住 Alt 键的同时拖动鼠标左键, 将视角调整到方便选取的位置, 并选中长方体朝向 Y 轴负方向的端面, 然后在显示窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation→Wave Port...”命令, 进行波端口的设置。首先是“Wave Port: General (通用)”对话框, 默认激励名为 WavePort1, 单击“下一步”按钮继续, 切换至“Wave Port: Modes (模式)”对话框, 在“Number of”项输入 1, 再单击“Integration Line”栏中的“None”右边的倒三角形, 选择“New Line...”命令来绘制积分线。选择“New Line...”命令后, 进入积分线绘制模式。然后移动鼠标至选中平面下棱边的中点并单击鼠标左键来确定积分线的起始点, 接着将鼠标移动到平面的上棱边中点并单击鼠标左键来确定积分线的终点, 如图 8-13 所示。注意当鼠标捕捉到平面棱边中点时, 会显示三角形标志。绘制完积分线后, 单击“下一步”按钮切换至“Wave Port: Post Processing (后处理)”对话框, 所有设置选择默认的设置, 单击“完成”按钮结束操作。

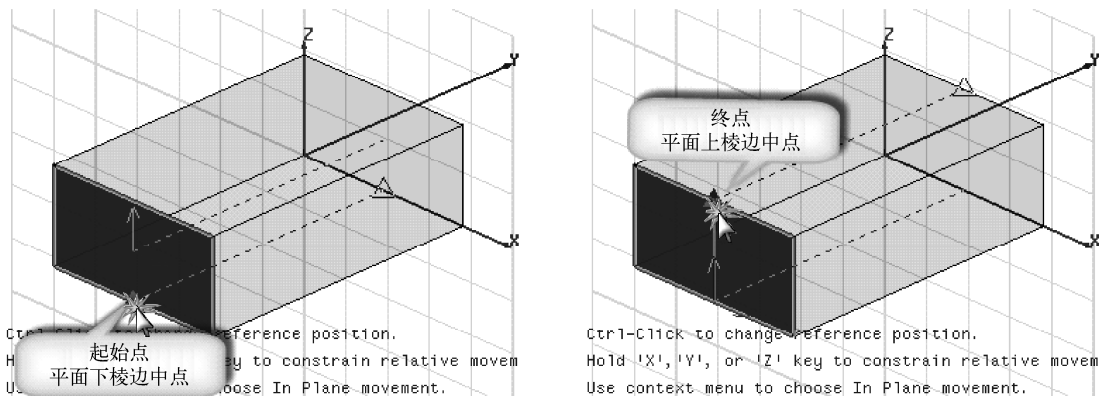



图 8-13 绘制波端口积分线



## 第二步：复制生成其他波导臂

### 1. 旋转复制生成②端口波导臂

在显示窗口中单击鼠标右键，选择“Select Objects”命令，返回模型选择模式。选中物体模型 T，然后执行“Edit→Duplicate→Around Axis”命令，或者单击工具栏中的按钮，命令执行后弹出如图 8-14 所示的对话框。按照图中所示设置，单击“确定”按钮执行复制操作，生成魔 T 的②端口波导臂 T\_1，如图 8-15 所示。由图可见，在复制波导臂的同时，激励端口也一并被复制，并生成新的端口 WavePort2。

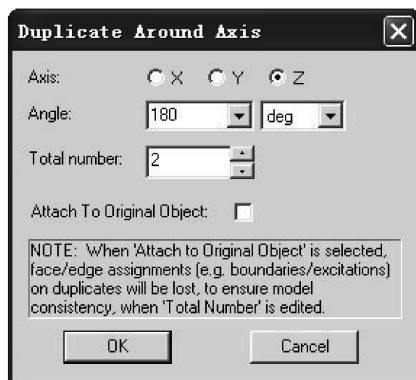


图 8-14 “Duplicate Around Axis（沿坐标轴旋转复制）”对话框

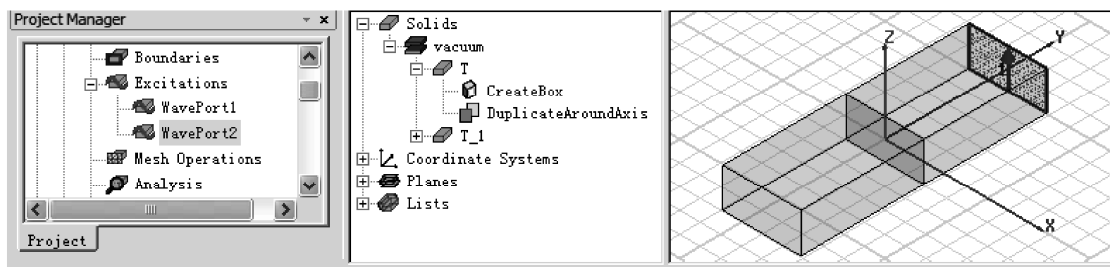




图 8-15 旋转复制操作生成波导臂 T\_1

### 2. 旋转复制生成③端口波导臂

再次选中波导臂模型 T，然后执行“Edit→Duplicate→Around Axis”命令，或者单击工具栏中的按钮，在弹出的对话框中按图 8-16 所示进行设置，最后单击“OK”按钮执行，生成端口③波导臂 T\_2。

### 3. 旋转复制生成④端口波导臂

再次选中波导臂模型 T，然后执行“Edit→Duplicate→Around Axis”命令，或者单击工具栏中的按钮，在弹出的对话框中按图 8-17 所示进行设置，最后单击“OK”按钮执行，生成④端口波导臂 T\_3。



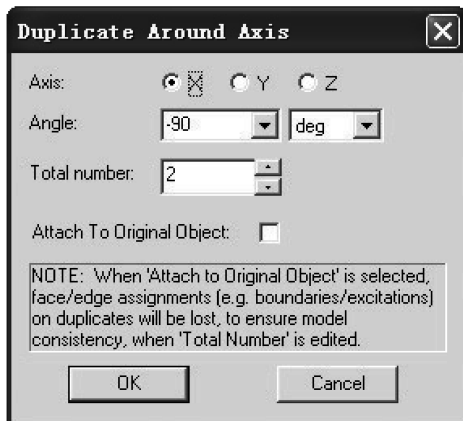


图 8-16 “Duplicate Around Axis  
(沿坐标轴旋转复制)”对话框

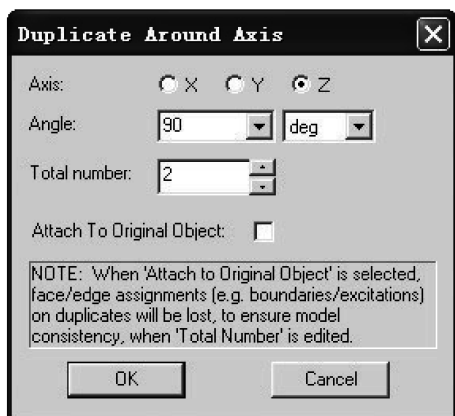



图 8-17 “Duplicate Around Axis  
(沿坐标轴旋转复制)”对话框

所有复制操作完成后,在按住键盘上的 Ctrl 键的同时,依次选择波导臂模型 T、T\_1、T\_2 和 T\_3,然后执行“Modeler→Boolean→Unite”命令,或单击工具栏中的按钮执行合并操作,将所有的波导臂组合在一起。选中组合模型 T,在属性窗口中单击“Transparent”项,调整透明度滑块,将魔 T 模型的透明度设置为 0.6。按下 Ctrl+D 键,以适当尺寸显示模型,如图 8-18 所示。

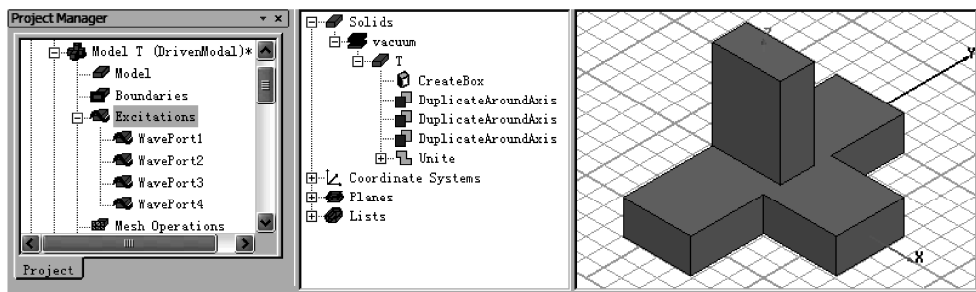




图 8-18 合并后的魔 T 模型

### 8.4.3 创建匹配锥体模型

首先选择魔 T 模型,再单击工具栏中的快捷命令按钮,暂时将魔 T 模型隐藏起来,以方便接下来的建模操作。

#### 1. 创建锥形体圆柱形底盘

执行绘制圆柱体命令“Draw→Cylinder”,或者单击工具栏中的快捷命令按钮,进入圆柱模型创建状态。在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑,具体操作为:在“Command”选项卡中,“Center Position”项设为 0mm, 0mm, 0mm;对称轴“Axis”项选择 Z 轴;圆柱半径

“Radius”项输入变量 r2；柱体高度“Height”项输入变量 h3；“Attribute”选项卡的内容保持默认设置，如图 8-19 所示。

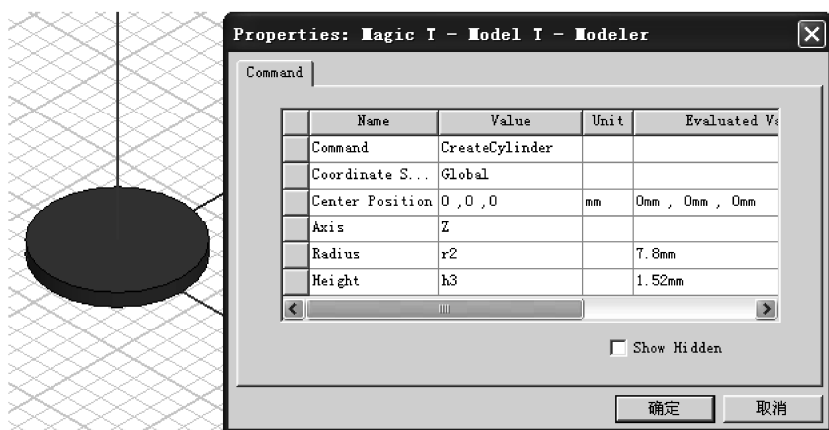



图 8-19 锥体底盘及“属性”对话框

## 2. 在底盘基础上创建锥体模型

执行绘制圆锥体命令“Draw→Cone”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入圆锥体模型创建状态。在模型显示窗口中创建一个任意大小的圆锥体模型。在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：在“Command”选项卡中，“Center Position”项设为 0mm, 0mm, h3；对称轴“Axis”项选择 Z 轴；上锥体半径“Upper Radius”项输入变量 r1；下锥体半径“Lower Radius”项输入变量 r2，锥体高度“Height”项输入变量 h2；“Attribute”选项卡的内容保持默认设置，如图 8-20 所示。

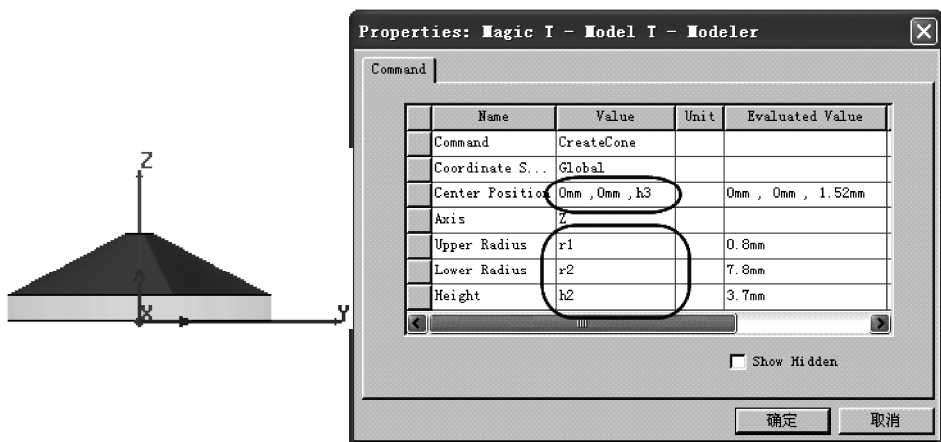



图 8-20 锥体及“属性”对话框

## 3. 在锥体基础上创建圆柱体模型

执行绘制圆柱体命令“Draw→Cylinder”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入圆



柱模型创建状态。在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。在弹出的模型“属性”对话框中相对应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：在“Command”选项卡中，“Center Position”项设为 0mm, 0mm, h3+h2；对称轴“Axis”项选择 Z；圆柱半径“Radius”项输入变量 r1；柱体高度“Height”项输入变量 h1；“Attribute”选项卡的内容保持默认设置，如图 8-21 所示。

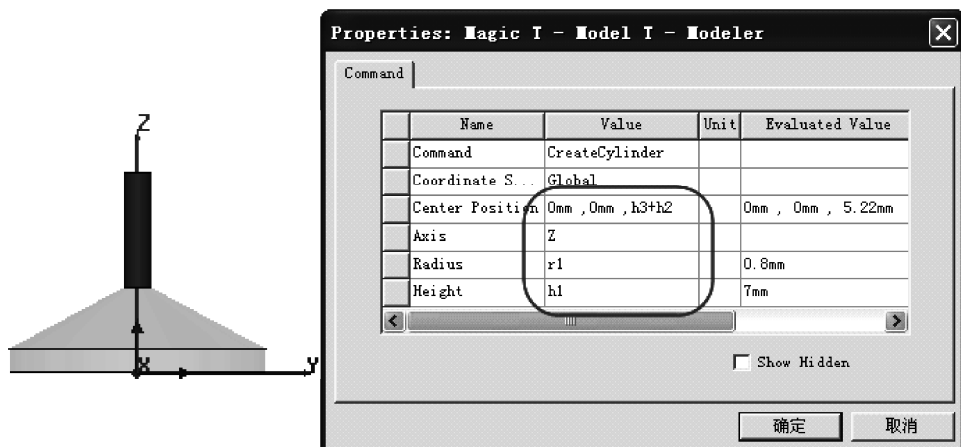



图 8-21 锥体及“属性”对话框

#### 4. 合并操作生成匹配锥体模型

按住 Ctrl 键的同时，依次选择锥体 Cone1、底盘 Cylinder1 和圆柱体 Cylinder2，然后执行“Modeler→Boolean→Unite”命令，或单击工具栏中的按钮执行合并操作，将三部分组合在一起生成匹配锥体模型 Cone1，再按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型，如图 8-22 所示。

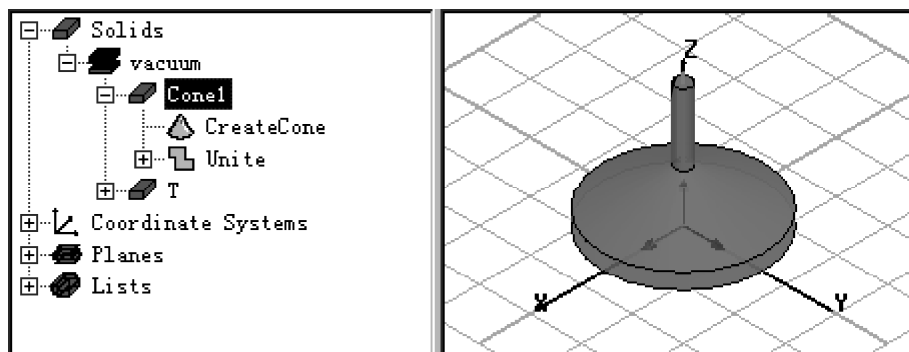



图 8-22 合并操作生成匹配锥体模型

#### 5. 平移操作将锥体放入魔 T 连接处

选中合并生成的组合锥体模型 Cone1，执行“Edit→Arrange→move”命令，或者单击工

具栏中的快捷命令按钮，命令执行后，在显示窗口中任意点选两个不同的坐标点，在弹出的移动操作的“属性”对话框中按照图 8-23 中所示进行设置，最后单击“确定”按钮完成操作。

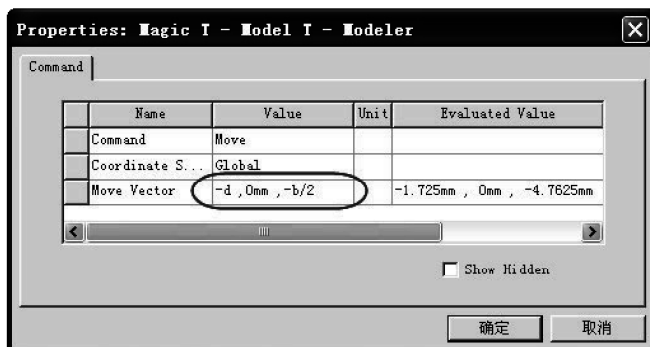



图 8-23 设置匹配锥体的移动属性

## 6. 设置属性

选中模型 Cone1，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令，打开模型材料的“属性选择”对话框，选择锥体模型的材料属性为 Pec，最后单击“确定”按钮关闭对话框。操作完成后，单击工具栏中的快捷命令按钮，在弹出的“显示设置”对话框中勾选模型 T 对应的“Visibility”列，单击“Done”按钮关闭对话框，即选择在显示窗口中显示模型 T。至此，便完成了魔 T 仿真模型部分的全部工作。按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型，如图 8-24 所示。

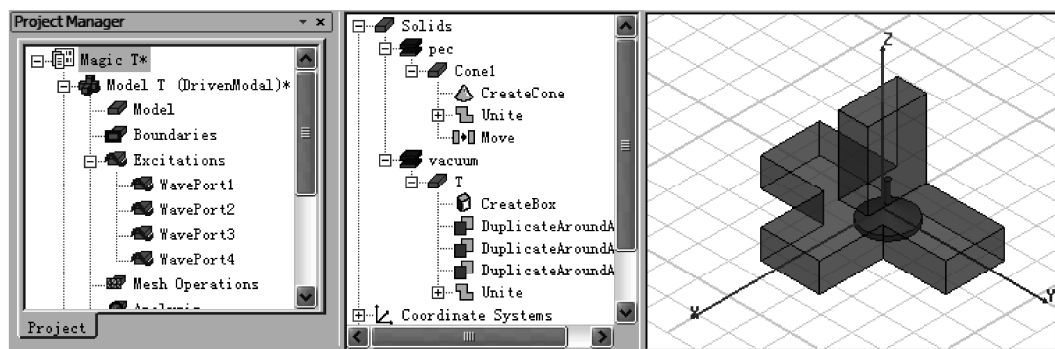


图 8-24 魔 T 的仿真模型


## 8.5 仿真的基本设置

### 8.5.1 求解设置

本章设计的魔 T 的工作中心频率为 12.5GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 12.5GHz。



具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 8-25 所示的“Solution Setup”对话框。

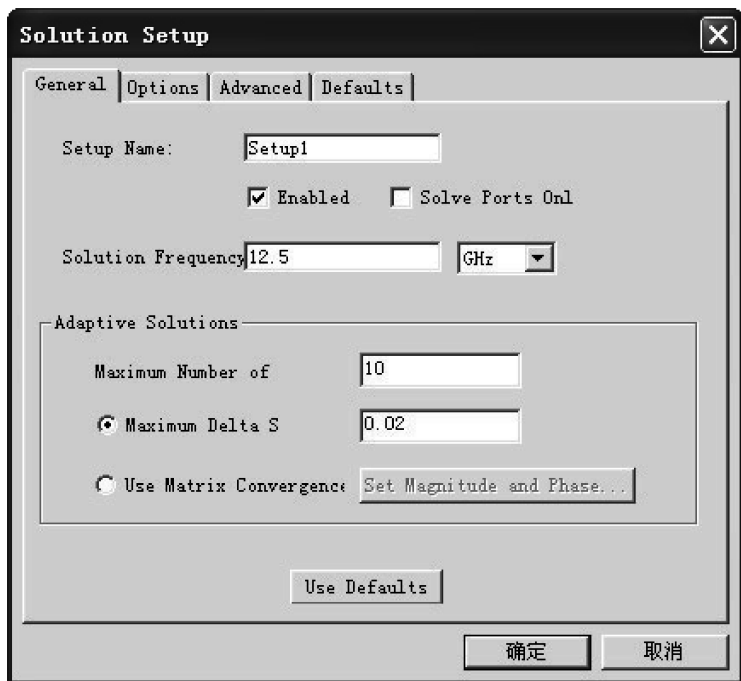



图 8-25 “Solution Setup”对话框

(2) 在“Solution Setup”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 12.5GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下。

## 8.5.2 扫频设置

添加一个 11.5~13.5GHz 的扫频设置，用以分析魔 T 在此频段内的传输特性。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 8-26 所示的“Edit Sweep”对话框。



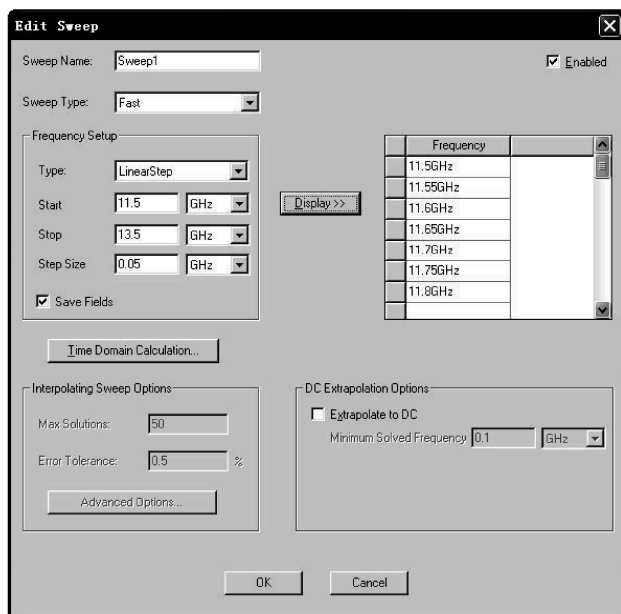





图 8-26 “Edit Sweep”对话框


(2) 在“Edit Sweep”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 11.5GHz，终止频率为 13.5GHz，步进长度为 0.05GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，则在右侧的频率列表中会显示扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下。

### 8.5.3 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了，但一般在正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口，如图 8-27 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的，如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置项“Setup1”上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 8-28 所示。

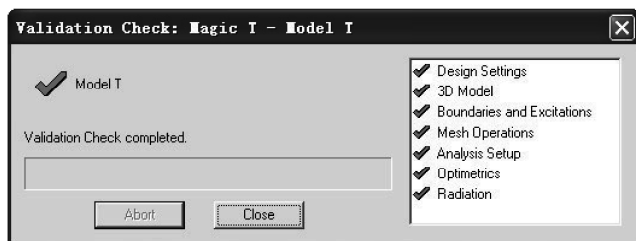


图 8-27 仿真有效性验证结果报告窗口

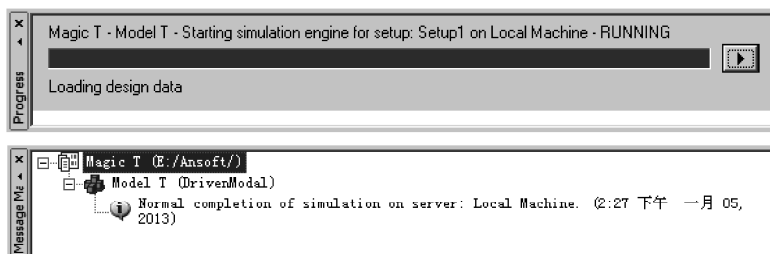


图 8-28 仿真分析进程窗口和信息管理窗口

## 8.6 查看仿真分析结果

### 8.6.1 计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 8-29 所示，打开如图 8-30 左图所示的“Solutions”对话框，然后切换至“Convergence”选项卡，在显示方式“View”项处分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

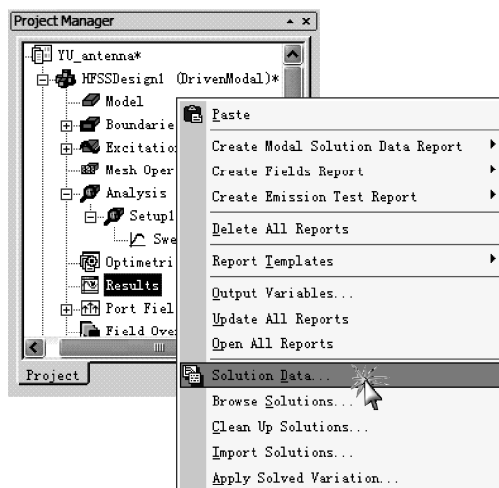


图 8-29 选择查看求解数据命令

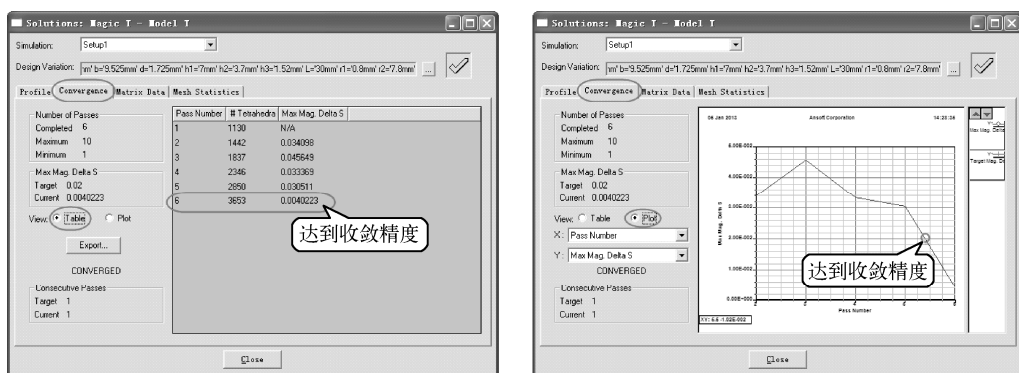


图 8-30 迭代收敛情况图表报告

由图 8-30 右图可知, 求解计算在迭代到第 6 次时达到了收敛精度, 因此仿真后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后, 求解还没有收敛, 则需要进一步增加迭代次数, 继续进行计算, 直到收敛为止。

### 8.6.2 魔 T 的匹配特性

对于魔 T 各个端口的匹配特性, 可以通过查看各个端口的回波损耗曲线来得到, 对应于 HFSS 软件 S 参数中的  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{44}$ 。

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令, 打开如图 8-31 所示的“Report”对话框。

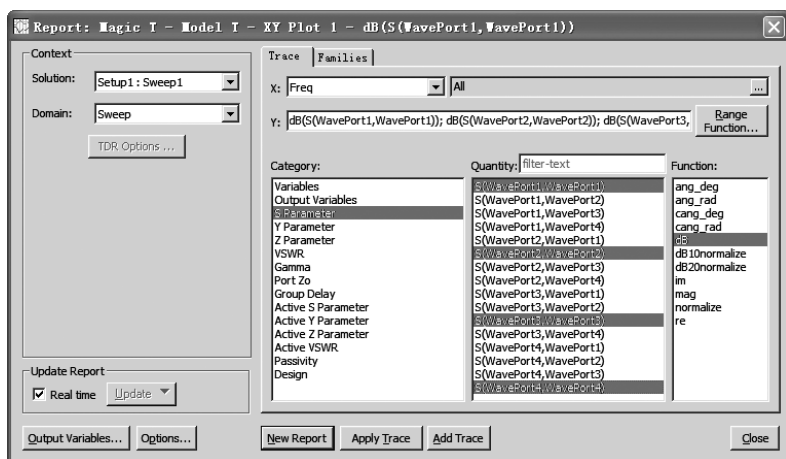


图 8-31 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1; 在“Category”栏中选择参数类型为 S parameter; 在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式  $S(\text{WavePort1}, \text{WavePort1})$ 、 $S(\text{WavePort2}, \text{WavePort2})$ 、 $S(\text{WavePort3}, \text{WavePort3})$  和  $S(\text{WavePort4}, \text{WavePort4})$ ; 在“Function”



栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New Report”按钮生成四个端口的  $S$  参数扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。生成的匹配特性曲线如图 8-32 所示。

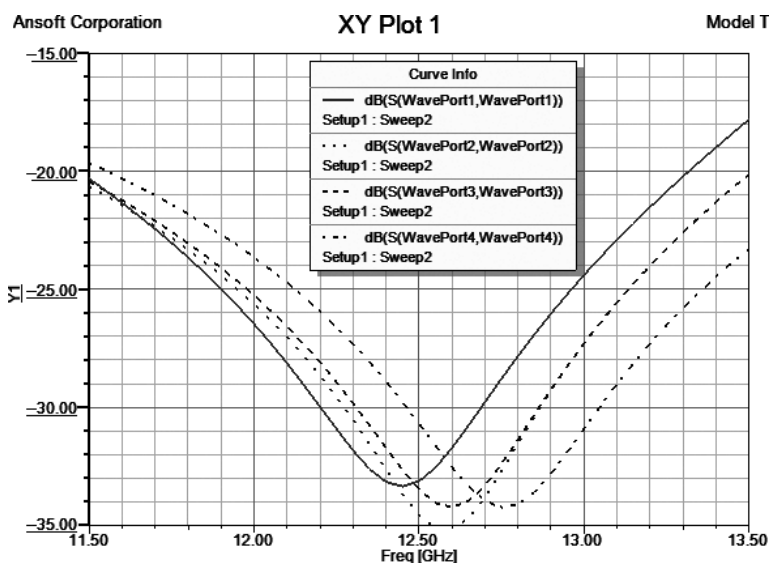


图 8-32 魔 T 的匹配特性曲线

由图 8-32 可见，魔 T 的四个端口的回波损耗均小于 -20dB，达到工程应用指标要求。

### 8.6.3 魔 T 的隔离特性

对于魔 T 的隔离特性，主要是指端口①和端口②之间的隔离，以及端口③和端口④之间的隔离，对应于 HFSS 软件  $S$  参数中的  $S_{12}$ 、 $S_{34}$ 。

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开如图 8-33 所示的“Report”对话框。

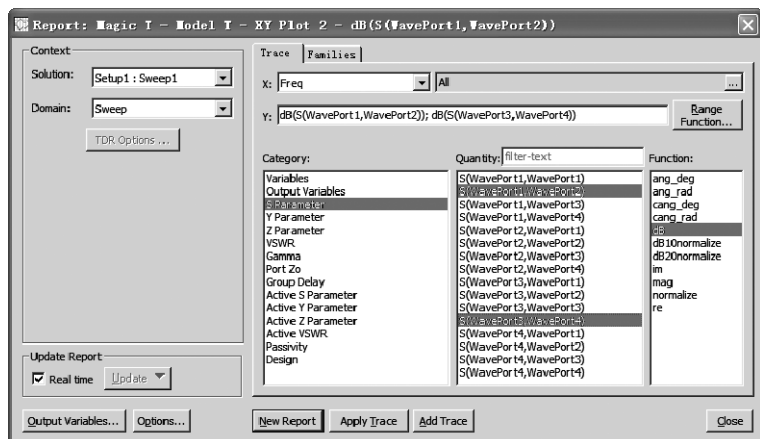


图 8-33 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1；在“Category”栏中选择参数类型为 S parameter；在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式  $S(\text{WavePort1}, \text{WavePort2})$ 、 $S(\text{WavePort3}, \text{WavePort4})$ ；在“Function”栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New Report”按钮生成四个端口的扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。生成的隔离特性曲线如图 8-34 所示。

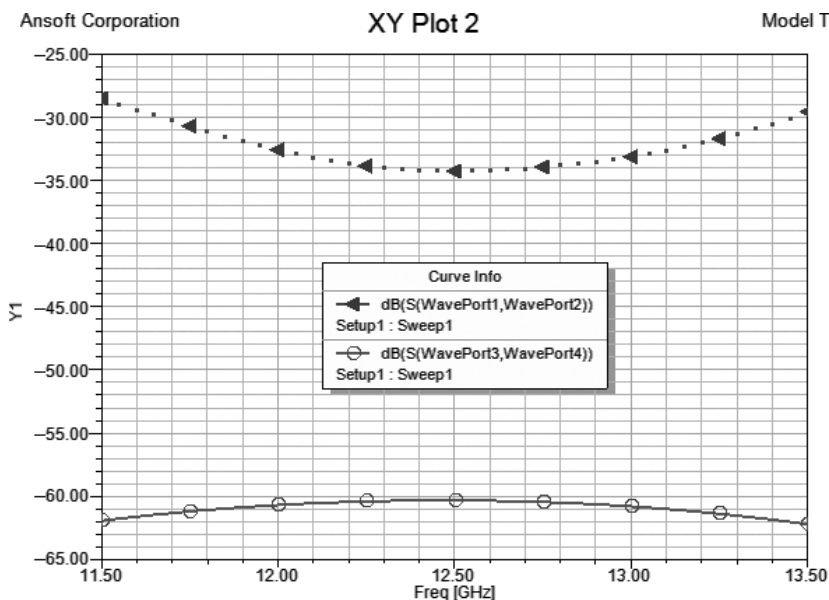


图 8-34 魔 T 的隔离特性曲线

由图 8-34 可见，魔 T 端口①和端口②之间的隔离大于-30dB，端口③和端口④之间的隔离优于-60dB，达到工程应用指标要求。

#### 8.6.4 魔 T 的平分特性

对于魔 T 的平分特性，主要指当端口③或端口④输入时，端口①和端口②输出的功率平分特性，对应于 HFSS 软件 S 参数中的  $S_{13}$ ， $S_{23}$ ， $S_{14}$ ， $S_{24}$ 。

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开如图 8-35 所示的“Report”对话框。

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1；在“Category”栏中选择参数类型为 S parameter；在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式  $S(\text{WavePort1}, \text{WavePort3})$ 、 $S(\text{WavePort2}, \text{WavePort3})$ 、 $S(\text{WavePort1}, \text{WavePort4})$ 和  $S(\text{WavePort2}, \text{WavePort4})$ ；在“Function”栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New Report”按钮生成四个端口的扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。生成的平分特性曲线如图 8-36 所示。

由图 8-36 可见，当端口③或端口④输入时，端口①和端口②输出的平分特性很好，其功率差小于 0.01dB。

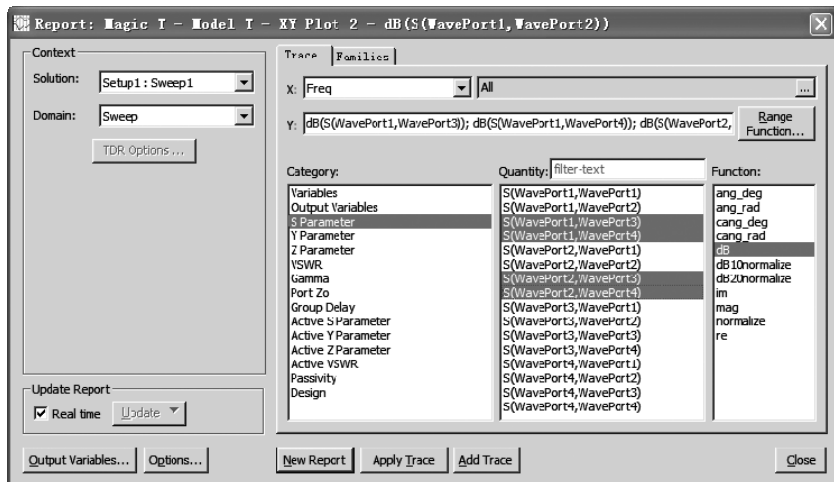


图 8-35 “Report”对话框

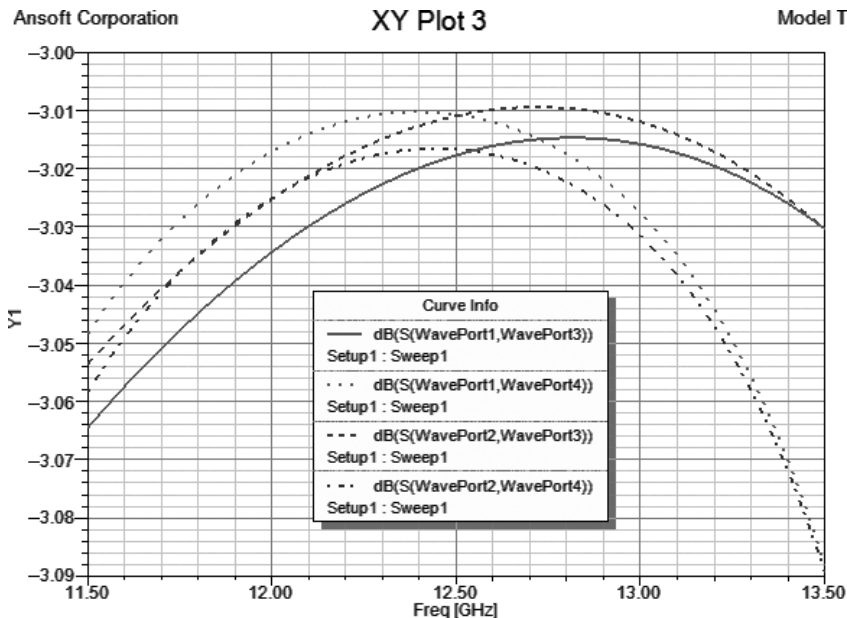


图 8-36 魔 T 的平分特性曲线

### 8.6.5 魔 T 的场分布图

选择魔 T，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Plot Field→E→mag E”命令，绘制场分布图，然后在主菜单栏中选择“HFSS→Fields→Edit Sources...”命令，打开激励设置对话框，分别指定不同的端口进行激励，接下来查看对应的场分布情况。详细的操作过程这里就不再介绍了，如果读者需要可以参考入门实例中绘制场分布图的章节内容。需要指出的是，指定哪个端口输入，对应激励项的“Scaling Factor”列就输入 1，非输



入端口为0。下面列举部分单端口激励情况时魔T的场分布以供参考，如图8-37所示。

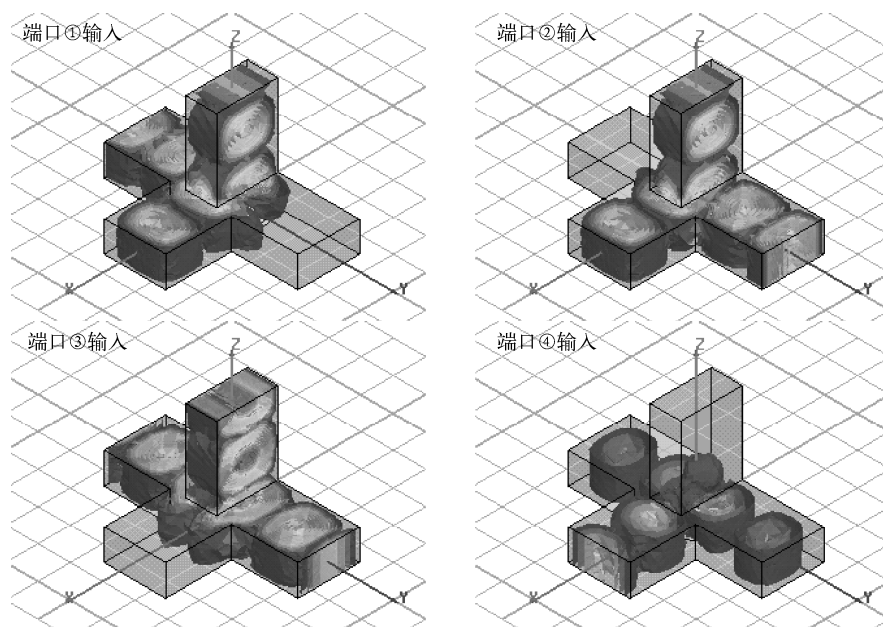


图 8-37 不同单端口输入时魔T的场分布

## 第9章 微带天线仿真实例

### 9.1 微带天线概述

微带天线的概念首先是由 Deschamps 于 1953 年提出来的，但是经过 20 多年，随着较好的理论模型及敷铜、敷金介质基片光刻技术的发展，Munson 和 Howell 才于 20 世纪 70 年代初期制造了实际上最早的微带天线。微带天线以其质量轻、体积小、成本低、平面结构、方便与集成电路集成和与载体共形等优点，得到了深入的研究和发展，大量应用于 100MHz~100GHz 宽频域上的无线电设备中，特别是在飞行器和地面便携式设备中得到了广泛应用。在微波天线领域里，微带天线形成了自己独立的研究方向。

如图 9-1 所示，典型的微带天线是由贴在带有金属底板的介质基片上的辐射贴片构成的，贴片导体通常为铜、铝和金等。贴片可以是任意形状的，但是通常都采用常规的形状以简化分析和评估其性能。

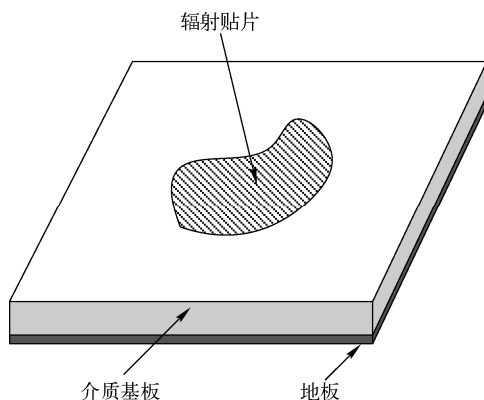


图 9-1 微带天线结构示意图

#### 9.1.1 微带天线的优缺点

##### 1. 微带天线的优点

- (1) 质量轻、体积小、剖面薄，容易与载体共形。
- (2) 制造成本低，易于批量生成。
- (3) 低剖面，不扰动飞行器空气动力学性能。
- (4) 安装简单、方便。
- (5) 天线散射截面（RCS）较小。
- (6) 容易获得线极化和圆极化性能。





- (7) 容易实现多频工作。
- (8) 不需要背腔。
- (9) 馈线与匹配网络可以和天线结构同时加工制作，并方便与其他器件进行组合式设计。

## 2. 微带天线的缺点

- (1) 频带比较窄。
- (2) 大多数微带天线只能向半空间辐射，端射性能差。
- (3) 最大增益受限。
- (4) 馈线与辐射单元之间的隔离差。
- (5) 易受表面波影响，功率容量较低。

### 9.1.2 微带天线的辐射原理

微带天线的辐射是由微带天线导体边沿和地板之间的边缘场产生的，可以用图 9-2 (a) 所示的简单情况来说明。这是一个矩形微带贴片，与地板之间的距离为几分之一一个波长。假定电场沿微带结构的宽度和厚度方向没有变化，则辐射贴片的电场如图 9-2 (b) 中所示，电场仅沿约为半波长的贴片长度方向变化。辐射基本上是由贴片开路边沿的边缘场引起的。矩形贴片两个宽边上的场相对于地板可以分解为法向分量和切向分量，这是因为贴片长为  $\lambda/2$ 。法向分量反向，由它们产生的远区场在正面方向上相互抵消，而平行于地板的切向分量同相位，使得合成场增强，从而使垂直于结构表面方向上的辐射场最强。因此，贴片可表示为相距  $\lambda/2$ 、同相激励并向地板上半空间辐射的两个长度为  $\Delta L$  的缝隙，如图 9-2 (c) 所示。

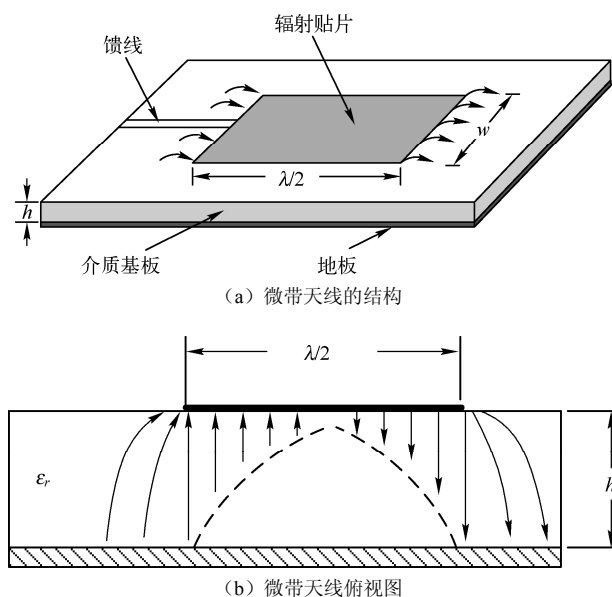
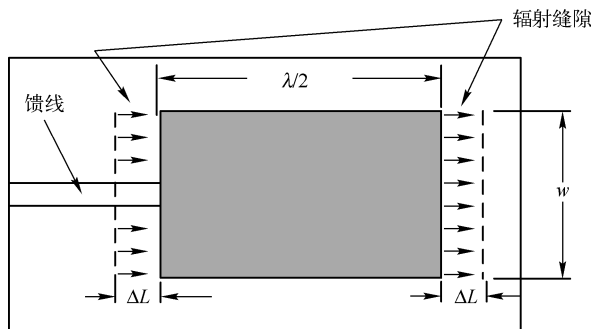


图 9-2 微带天线辐射原理



(c) 微带天线侧视图

图 9-2 微带天线辐射原理 (续)

当然,也可以考虑电场沿贴片宽度的变化。这时,微带天线可以用贴片周围的四个缝隙来表示。同理,其他形状的微带天线结构也可用等效的缝隙来表示。

微带天线单元既可以独立使用,也可以作为阵列的一部分和其他相同的单元组合使用。无论哪种情况,设计者均应掌握基本辐射单元的设计方法和步骤。通常,设计的总目标是在指定的工作频率上得到特定的工作特性。要使微带天线达到这个总目标,首先应选择合适的天线的几何形状。矩形贴片和圆形贴片是最普通的两种类型,接下来将通过这两种基本的贴片形式来介绍微带天线的设计步骤及 HFSS 优化方法。

## 9.2 矩形微带天线设计实例

对于矩形微带天线的辐射特性分析已经有许多数学表达式和模型,这里就不一一详细列出了,下面重点介绍工程设计步骤和 HFSS 优化的实现。

本节设计的矩形微带天线的中心工作频率为 3GHz,选用的介质板为聚四氟乙烯板 (polyethylene),其相对介电常数  $\epsilon_r = 2.25$ ,厚度  $h=5\text{mm}$ ,采用同轴线从底板馈电,模型如图 9-3 所示。

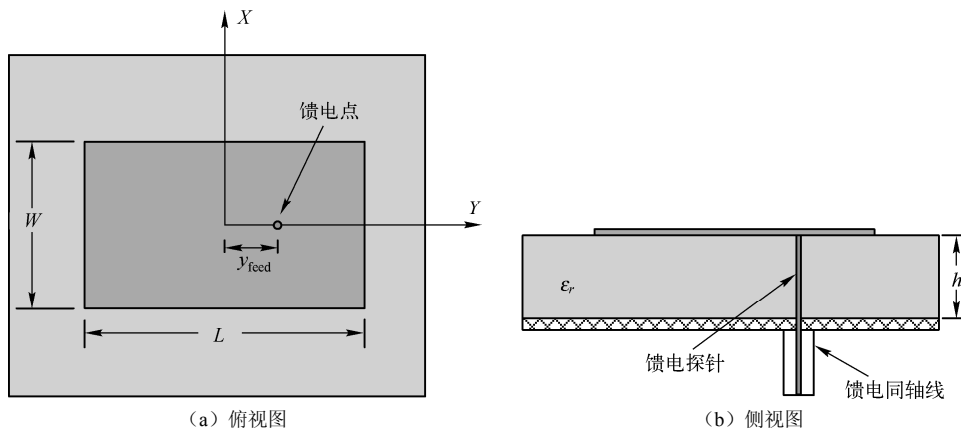


图 9-3 同轴线馈电的矩形微带天线



## 9.2.1 矩形微带天线的设计步骤

### 1. 计算矩形微带贴片的宽度 $W$

矩形微带贴片的宽度  $W$  可以通过式 (9-1) 来计算:

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{1 + \varepsilon_r}} \quad (9-1)$$

式中,  $c$  表示真空中的光速;  $f_0$  表示天线的工作频率;  $\varepsilon_r$  表示介质的相对介电常数。

将  $\varepsilon_r = 2.25$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $f_0 = 3 \text{ GHz}$  代入式 (9-1) 得矩形微带贴片的宽度  $W = 39.2 \text{ mm}$ 。

当然, 也可以选择其他宽度。但是当选用小于式 (9-1) 计算的宽度时, 贴片辐射的效率较低, 而选用大于式 (9-1) 计算的宽度时, 辐射效率虽然高, 但将产生高次模, 从而引起场的畸变。

### 2. 计算等效介电常数 $\varepsilon_{\text{eff}}$

矩形微带天线的等效介电常数可以按照式 (9-2) 来计算:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} \quad (9-2)$$

将  $\varepsilon_r = 2.25$ ,  $h = 5 \text{ mm}$ ,  $W = 39.2 \text{ mm}$  代入式 (9-2), 得  $\varepsilon_{\text{eff}} = 2.018$ 。

### 3. 计算等效辐射缝隙长度 $\Delta L$

通过 9.1 节的分析已知矩形微带天线的辐射可以等效为两个宽度为  $W$ 、长度为  $\Delta L$  的缝隙的辐射, 对于等效辐射缝隙长度  $\Delta L$ , 可以按照式 (9-3) 计算得到:

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\varepsilon_{\text{eff}} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_{\text{eff}} - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (9-3)$$

将  $\varepsilon_{\text{eff}} = 2.018$ ,  $h = 5 \text{ mm}$ ,  $W = 39.2 \text{ mm}$  代入式 (9-3) 得到  $\Delta L = 2.55 \text{ mm}$ 。

### 4. 计算矩形微带贴片长度 $L$

矩形微带贴片长度可以通过式 (9-4) 计算得到:

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (9-4)$$

将  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $f_0 = 3 \text{ GHz}$ ,  $\varepsilon_{\text{eff}} = 2.018$ ,  $\Delta L = 2.55$  代入式 (9-4) 中得矩形微带贴片长度  $L = 30 \text{ mm}$ 。

### 5. 计算同轴线馈电位置

本节设计的矩形微带天线采用同轴线馈电, 在确定了贴片长度  $L$  和宽度  $W$  之后, 还需要确定同轴线馈电点的位置, 馈电点的位置会影响天线的输入阻抗。在矩形微带天线应用中通常使用  $50\Omega$  的标准阻抗传输线馈电, 因此需要确定馈电点的位置使天线的输入阻抗等于  $50\Omega$ 。在之前的分析中已知矩形微带天线沿宽度  $W$  方向的场不变, 因此馈电点可以位于  $W$  方向的任意位置, 但是一般取在宽度方向的中点, 这样做的好处是可以有效避免高次模的产生。

在贴片长度  $L$  方向, 由于场有二分之一波长的变化, 所以阻抗会以中心点为界, 向  $L$  方向两侧逐渐变大, 对于如图 9-3 所示的同轴线馈电的矩形微带天线, 坐标原点位于贴片的中心, 长度  $L$  方向与  $Y$  轴方向重合, 对应于输入阻抗为  $50\Omega$  的馈电点位置坐标  $y_{\text{feed}}$  可以按照式 (9-5) 计算:

$$y_{\text{feed}} = \frac{L}{2\sqrt{\xi_{\text{re}}(L)}} \quad (9-5)$$

式中,  $\xi_{\text{re}}(L) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{L}\right)^{-1/2}$ 。

将  $\varepsilon_r = 2.25$ ,  $h = 5\text{mm}$ ,  $L = 30\text{mm}$  代入式 (9-5), 得  $y_{\text{feed}} = 10.68\text{mm}$ 。

经过以上的分析和计算步骤, 矩形微带天线的主结构的初步尺寸已经基本确定, 下面利用 HFSS 软件进行仿真设计。

## 9.2.2 创建工程设计

### 1. 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令, 或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件, 如图 9-4 所示。



图 9-4 启动 HFSS 软件

当软件启动后, 会自动创建一个新工程, 其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计, 名称为 HFSSDesign1, 并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”, 单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令, 将设计名称改为 Microstrip。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令, 将工程保存在指定的文件夹内, 并命名为 Microstrip\_antenna.HFSS, 如图 9-5 所示。

### 2. 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项, 选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令, 在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮, 然后单击“OK”按钮完成操作, 如图 9-6 所示。

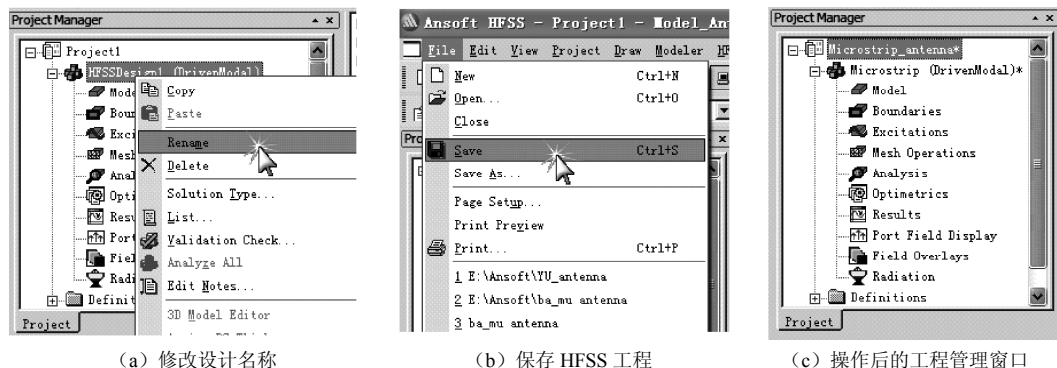


图 9-5 创建并保存新工程

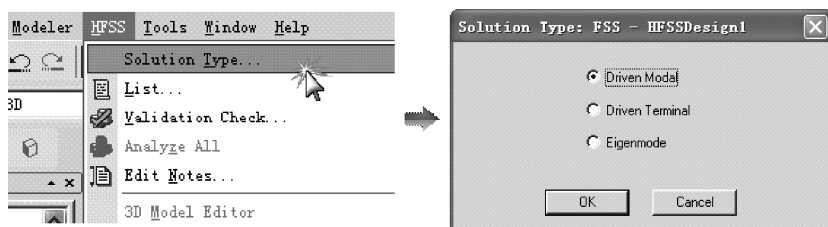


图 9-6 设置求解类型

### 3. 设置模型的尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”项，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 9-7 所示。

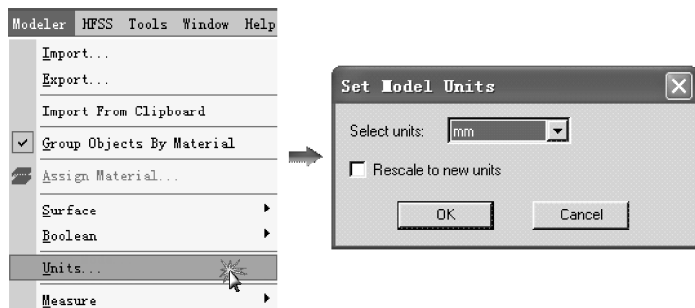


图 9-7 设置模型尺寸单位

### 4. 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tool→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中，选择“Drawing”选项卡，勾选窗口最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，如图 9-8 所示。

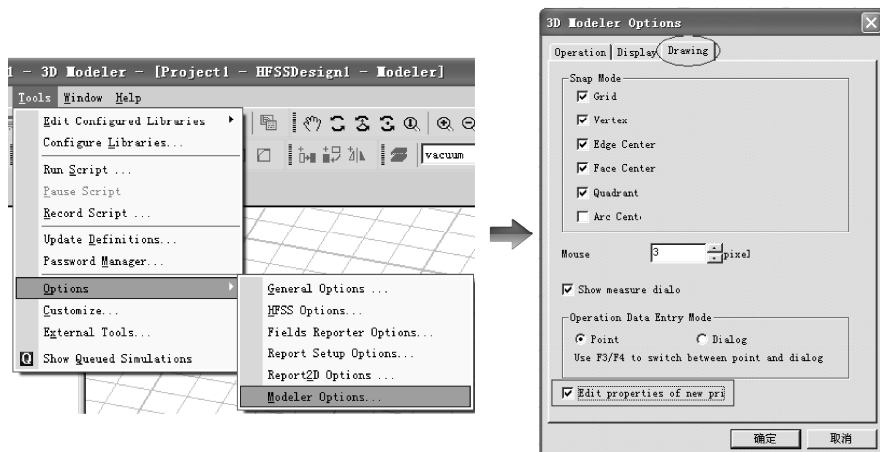


图 9-8 设置“3D Modeler Options”对话框

勾选此项是为了在建模操作过程中，当创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出模型的“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型的属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

### 9.2.3 创建矩形微带天线的仿真模型

#### 1. 定义设计变量

为了进行参数建模，在建模之前需要定义相关的模型参数变量。根据 9.2.1 节的计算结果，相关的设计变量有：矩形贴片宽度  $W=39.2\text{mm}$ ，矩形贴片长度  $L=30\text{mm}$ ，介质基板高度  $h=5\text{mm}$ ，馈电点距离中心坐标  $\text{feed}=10.68\text{mm}$ 。

首先定义设计变量  $W=39.2\text{mm}$ 。在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的“设计变量”对话框中单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称  $w$ ，在“Value”栏中给变量赋值  $39.2\text{mm}$ ，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量  $w$ 。变量定义步骤如图 9-9 所示。

再次单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称  $L$ ，在“Value”栏中给变量赋值  $30\text{mm}$ ，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量  $L$ 。

重复以上步骤添加其他设计变量，添加完成后的设计变量列表如图 9-10 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。

#### 2. 创建参考地平面

上述对矩形微带天线的分析都是基于参考地平面是无限大的基础上的，然而在实际设计中，参考地都是有限面积的，理论分析证明当参考地平面比微带贴片大  $6h$  的距离时，

计算结果可以达到足够的准确度, 因此设计中参考地的长度  $L_{\text{GND}}$  和宽度  $W_{\text{GND}}$  只需满足以下条件即可:

$$L_{\text{GND}} \geq L + 6h = 60.1\text{mm}$$

$$W_{\text{GND}} \geq W + 6h = 69.2\text{mm}$$

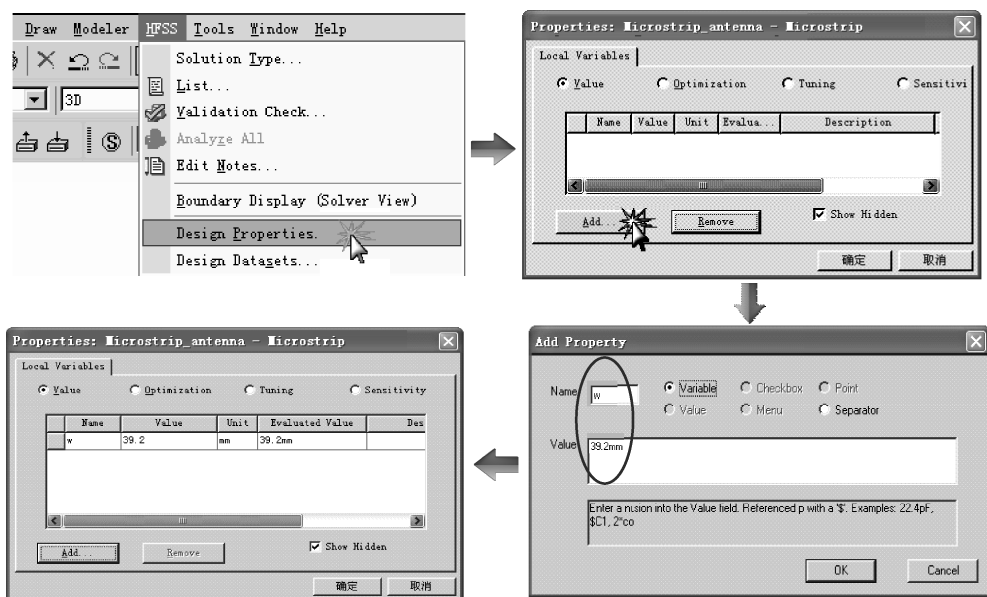


图 9-9 定义设计变量

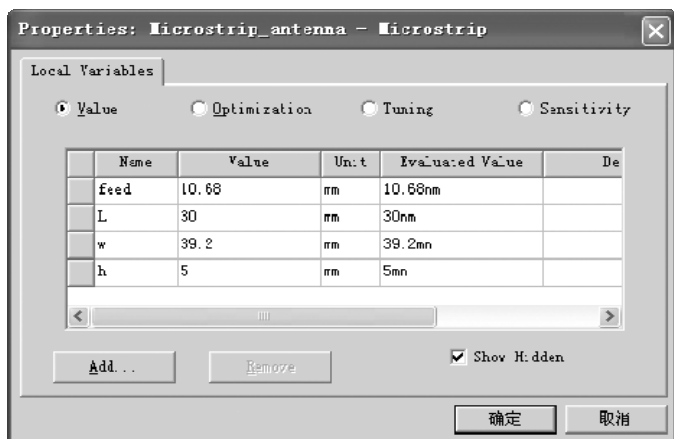



图 9-10 添加完成后的设计变量列表

本设计选择参考地平面为 80mm×80mm 的正方形平面。

在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮, 执行矩形平面绘制命令后, 用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点, 然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后, 系统自动生成一个矩形平面, 其默认名称为

Rectangle1, 并弹出矩形平面的“属性”对话框。在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑, 具体操作为: “Command”选项卡中的起始点位置“Position”项设为-40mm, -40mm, 0mm; 对称轴“Axis”项设为 Z 轴; “XSize”设为 80mm; “YSize”设为 80mm; “Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 GND。设置完成后的属性对话框如图 9-11 所示, 单击“确定”按钮完成操作。

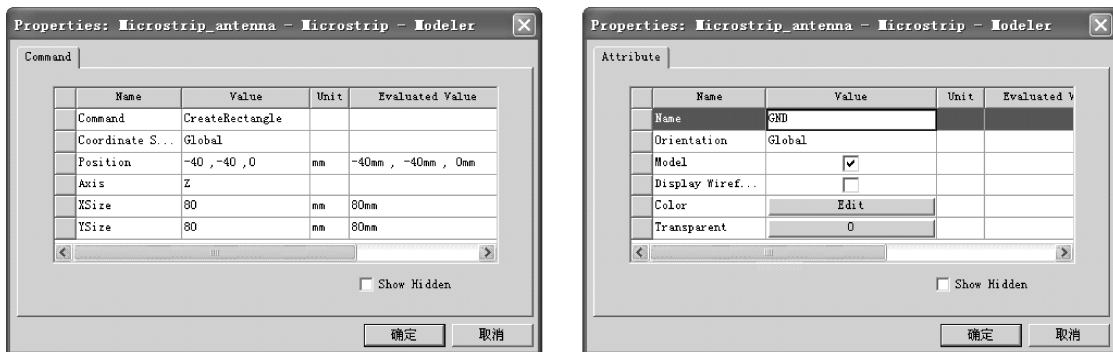


图 9-11 绘制任意矩形并修改“属性”对话框

参考地平面创建完成后, 在模型显示窗口选中 GND 平面, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary→Perfect E”命令, 打开“Perfect E Boundary”设置对话框, 将“Name”项改为 PerfE\_GND, 单击“OK”按钮完成操作 (如图 9-12 所示), 即给平面分配了理想导体边界条件, 这样就可以用来模拟理想薄导体微带贴片了。

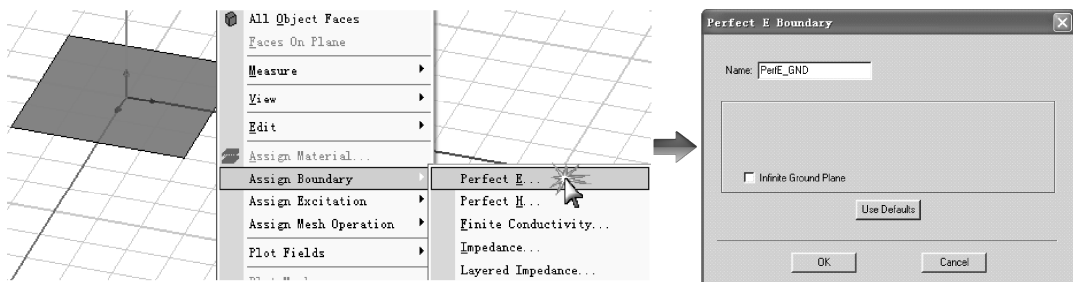



图 9-12 设置地平面 GND 为理想导体边界

### 3. 创建介质基板

(1) 选择绘制长方体命令“Draw→Box”, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 进入长方体模型创建状态。

(2) 在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。

(3) 在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑, 具体操作为: “Command”选项卡的中心点位置设为-30mm, -30mm, 0mm; “XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别设为 60mm、60mm 和 h; 单击切换至“Attribute”选项卡, 将“Name”栏中的 Box1 改为 Substrate, 单击“Transparent”项的“Value”列中的按钮, 调整滑块位置, 将模型透明度设置为 0.6, 其他选项保持默认设置不变, 如图 9-13 所示。最后单击“确定”



按钮完成介质基板的创建。

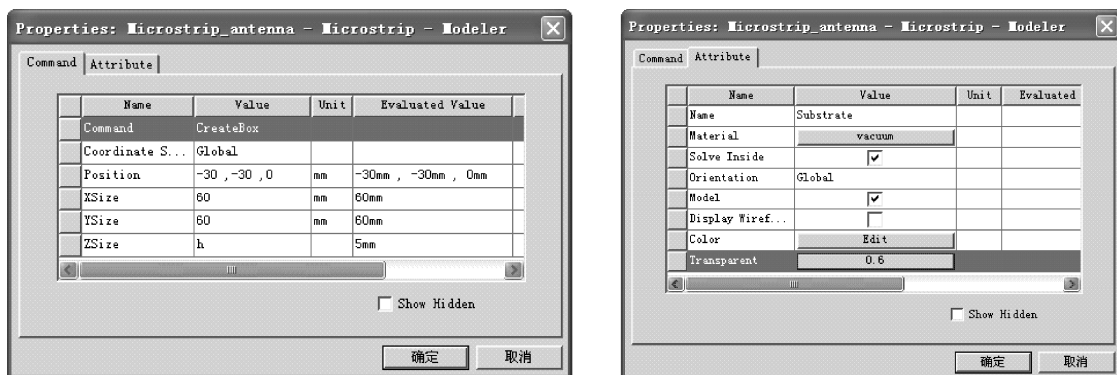


图 9-13 编辑好的介质基板“属性”对话框

(4) 选中创建好的介质基板模型，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令，打开如图 9-14 所示的“Select Definition”对话框。

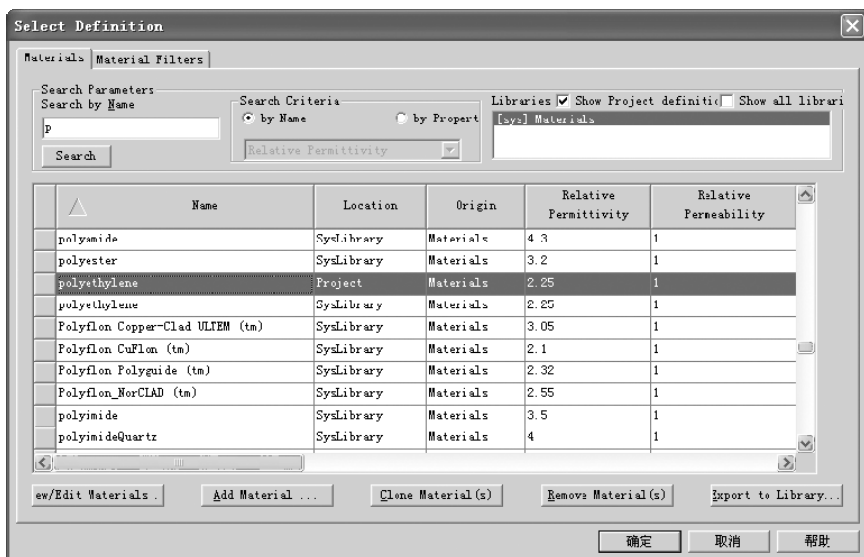



图 9-14 设置介质基板模型的材料属性

选择介质基板材料为 polyethylene，其对应的相对介电常数值为 2.25，单击“确定”按钮关闭对话框。然后按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角。然后再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-15 所示。

#### 4. 创建矩形微带贴片

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮，执行矩形平面绘制命令。

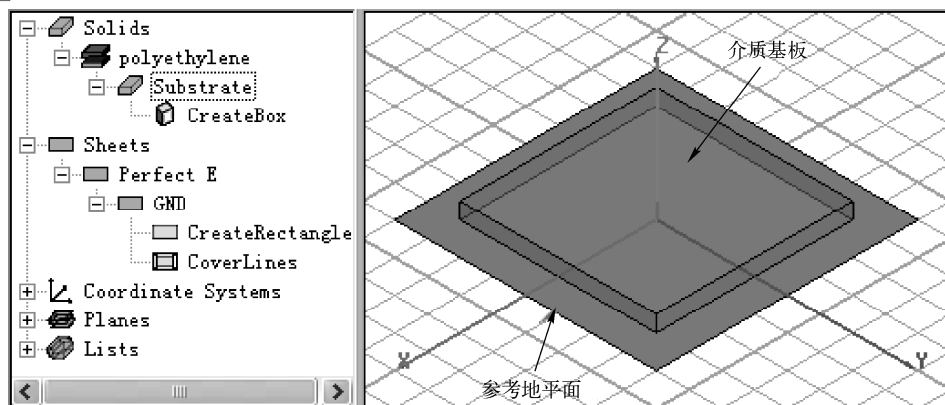


图 9-15 创建完介质基板后的模型

(2) 用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。

(3) 操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 **Rectangle1**，并弹出矩形平面的“属性”对话框。在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡中的起始点位置“Position”项设为  $-w/2$ mm,  $-L/2$ mm,  $h$ ；对称轴“Axis”项设为 Z 轴；“XSize”设为  $w$ ；“YSize”设为  $L$ ；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 **Patch**，设置完成后的“属性”对话框如图 9-16 所示，单击“确定”按钮完成操作。

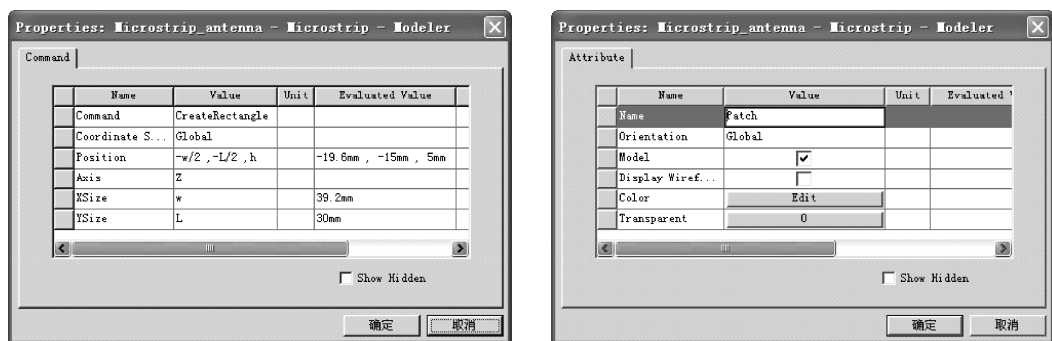


图 9-16 矩形微带贴片的“属性”对话框

(4) 矩形微带贴片创建完成后，在模型显示窗口选中 **Patch** 平面，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Perfect E”命令，打开“Perfect E Boundary 置”对话框，将“Name”项改为 **PerfE\_Patch**，单击“OK”按钮完成操作（如图 9-17 所示），即给平面 **Patch** 分配了理想导体边界条件，这样就可以用来模拟理想薄导体微带贴片了。

## 5. 创建同轴线馈电探针

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Cylinder”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮

，进入创建圆柱体模型状态。

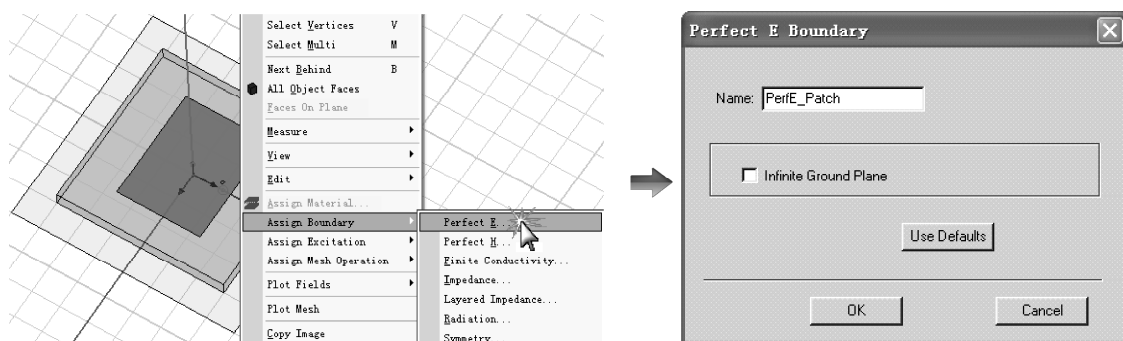


图 9-17 设置微带贴片的 Patch 理想导体边界

(2) 此时鼠标进入捕捉状态，移动鼠标，在工作平面上的任意点单击鼠标左键，确定圆柱体中心位置；在  $xy$  平面绘制出一个圆形后，在任意点单击鼠标左键确定圆柱体半径；向  $z$  轴正方向移动鼠标，绘制出圆柱体形状后，在任意点单击鼠标左键确定圆柱体的高度。这样任意一个圆柱体模型就创建完成了。

(3) 操作完成后，在生成圆柱体模型的同时，会自动弹出圆柱体的“属性”对话框，接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项，具体操作为：在“Command”选项卡中编辑圆柱体的位置尺寸属性，将中心点“Center Position”项修改为 0mm, feed, 0mm；对称轴“Axis”项选为 Z 轴；半径“Radius”项输入 0.5；高度“Height”项输入  $h$ 。

单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Cylinder1 改为 feed，其他选项保持默认设置不变，如图 9-18 所示。

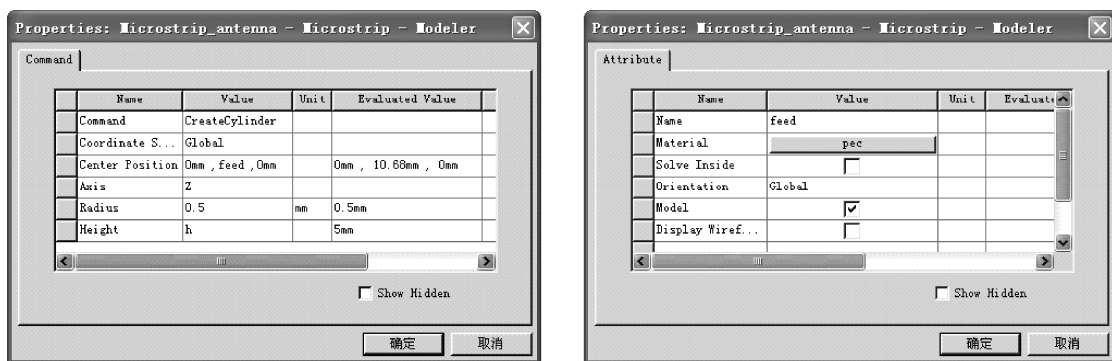


图 9-18 修改后的“Command”和“Attribute”选项卡

编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的馈电探针 feed，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

(4) 选中馈电探针模型 feed，在显示窗口单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令，打开“属性”对话框。选择探针的材料属性为 Pec，单击“确定”按钮关闭对话框。然后按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双

击鼠标左键调整视角。然后再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-19 所示。

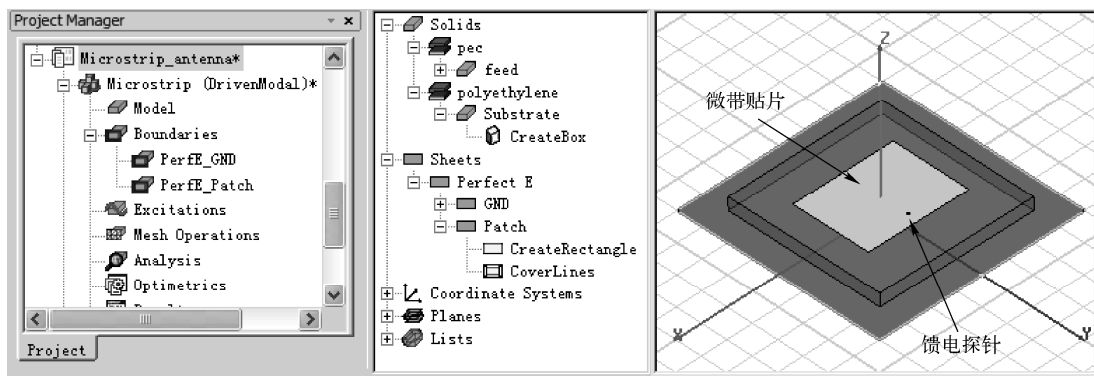



图 9-19 创建完馈电探针后的模型

## 9.2.4 设置激励及边界条件

### 1. 设置集总端口激励

#### 1) 创建激励平面

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Circle”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 进入创建圆形平面模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态，第一步移动鼠标，在工作平面的任意点单击鼠标左键确定圆形平面中心位置；第二步移动鼠标在 xy 平面绘制出一个圆形后，在任意点单击鼠标左键确定圆形平面半径。这样任意一个圆形平面模型就创建完成了。

(3) 操作完成后，在生成圆形平面模型的同时，会自动弹出圆形平面模型的“属性”对话框，接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项，具体操作为：在“Command”选项卡中编辑圆形平面模型的位置尺寸属性，将中心点“Center Position”项修改为 0mm, feed, 0mm, 对称轴“Axis”项选为 Z 轴，半径“Radius”项输入变量 1.5mm；单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Circle1 改为 port，其他选项保持默认设置不变，如图 9-20 所示。

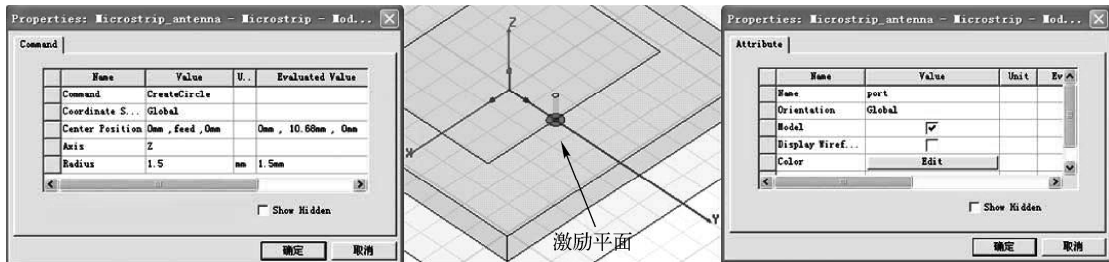



图 9-20 激励平面及“属性”对话框

编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的圆形平面模型 port，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

## 2) 从参考地平面中减去激励平面

由于参考地平面为理想导体边界，为使能量穿过参考地平面，为微带贴片提供激励，需要在参考地平面上开一个与激励平面同样大小的孔。

按住键盘上的 Ctrl 键不放，在操作历史树的“Sheet”节点中先后选取模型 GND 和 port，然后执行“Modeler Boolean subtract”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，弹出“Subtract”对话框，利用对话框中间的“-->”和“<--”按钮，将 GND 移动到“Blank”栏中，将 port 移动到“Tool Parts”栏中，然后勾选对话框下面的“Clone tool objects before subtracting”复选框，单击“OK”按钮执行相减操作，这样就在参考地平面上开了一个与激励平面同样大小的孔，同时又保留了激励平面，如图 9-21 所示。

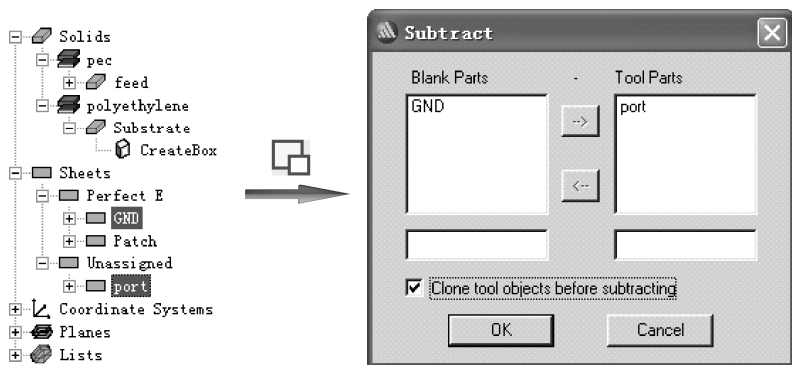



图 9-21 从参考地平面中减去激励平面

## 3) 设置集总端口激励

选择操作历史树的“ Sheets”节点中的 port 平面，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitations Lumped port”命令，打开“Lumped Port”对话框。首先在“General”标签页中默认激励名为 LumpedPort1，再单击“下一步”按钮进入“Modes”标签页，在“Number of”项输入 1，在“Integration Line”列中单击鼠标左键，在弹出的下拉菜单中选择“New Line...”命令，进入绘制积分线状态，在 HFSS 界面最底端的状态栏中的“X”、“Y”和“Z”文本框中输入积分起始点坐标 (0,12.18,0)，然后按 Enter 键确定，在接下来出现的“dX”、“dY”和“dZ”文本框内分别输入 0，-1 和 0，再次按 Enter 键完成积分线的绘制。单击“下一步”按钮进入“Post Processing”标签页，选取默认设置，单击“完成”按钮结束激励的设置操作。设置完成后，在工程管理窗口的“Excitations”节点下会自动添加刚创建的 LumpedPort1 激励，单击并放大查看激励，如图 9-22 所示。

## 2. 设置辐射边界条件

### 1) 创建辐射空气腔

(1) 选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入

长方体模型创建状态。

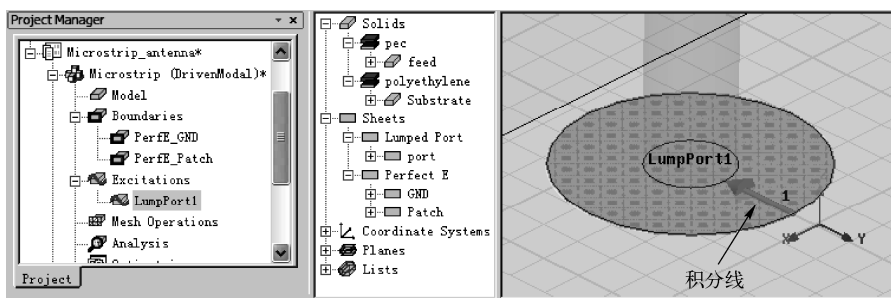


图 9-22 选择查看集总端口激励

(2) 在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。

(3) 在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为-60mm，-60mm，-20mm；“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 120mm、120mm 和 60mm；单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Box1 改为 air，单击“Transparent”项“Value”列中的按钮，调整滑块位置，将模型透明度设置为 0.8，其他选项保持默认设置不变，如图 9-23 所示。最后单击“确定”按钮完成空气腔的创建。

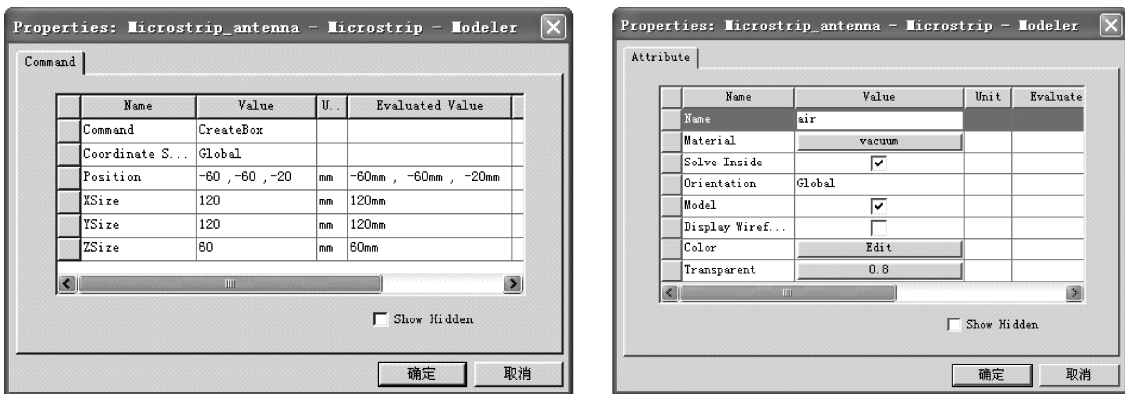


图 9-23 编辑好的空气腔“属性”对话框

## 2) 设置辐射边界条件

选中创建好的空气腔模型 air，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Radiation...”命令，打开“Radiation boundary”设置对话框，保持默认设置，单击“OK”按钮完成操作，在工程管理树中的“Boundaries”节点下便会自动添加辐射边界 Rad1。

到此就完成了矩形微带天线仿真模型的创建工作，再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-24 所示。

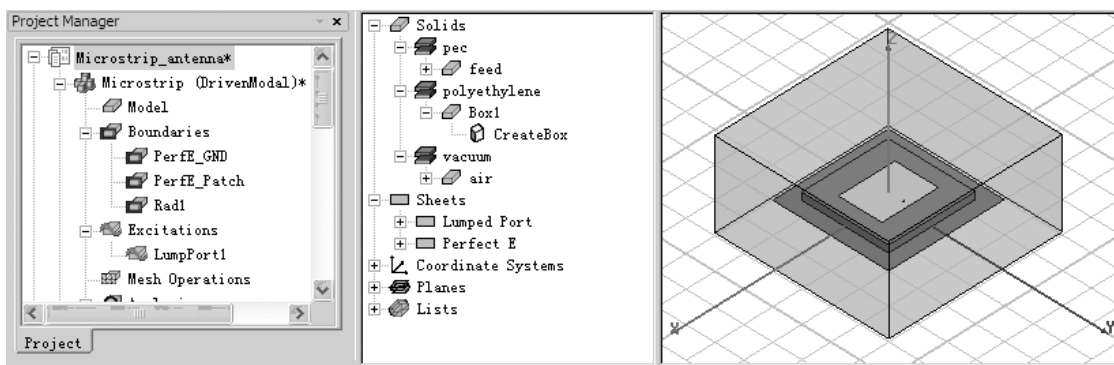



图 9-24 创建完成的仿真模型

## 9.2.5 仿真的基本设置

### 1. 求解设置

本节设计的矩形微带天线的工作中心频率在 3GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 3GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 9-25 所示的“Solution Setup”对话框。

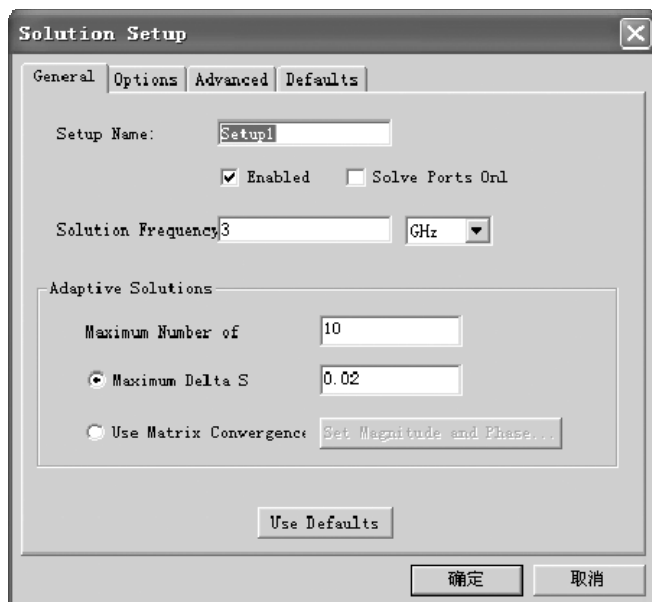


图 9-25 “Solution Setup”对话框

(2) 在“Solution Setup”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名




称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 3GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并被自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下。

## 2. 扫频设置

为了了解天线在中心频点附近的工作情况，还需要添加一个 2.5~3.5GHz 的扫频设置，用以分析天线在此频段内的电压驻波比等参数。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项“Setup1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 9-26 所示的“Edit Sweep”对话框。

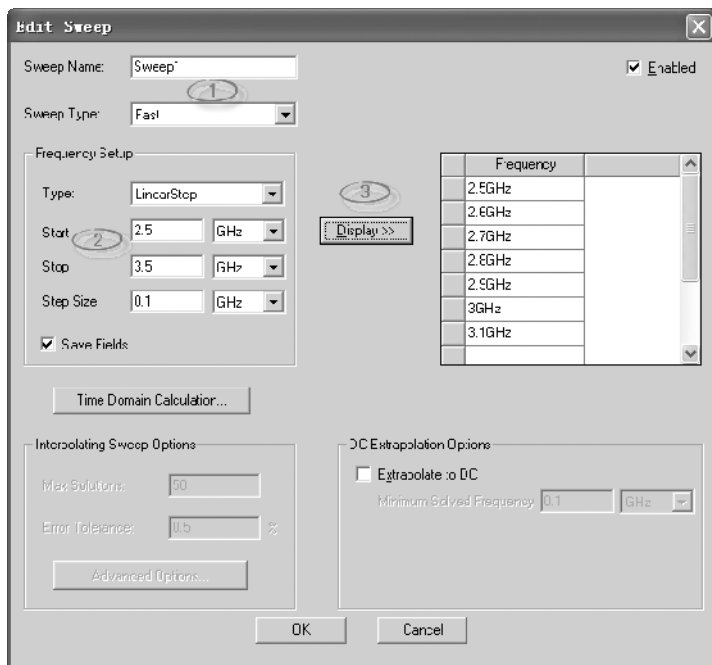


图 9-26 “Edit Sweep”对话框

(2) 在“Edit Sweep”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择快速扫频 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 2.5GHz，终止频率为 3.5GHz，步进长度为 0.1GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，则在右侧的频率列表中会显示扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下，如图 9-27 所示。








图 9-27 求解的相关设置

### 3. 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了。但一般在正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口，如图 9-28 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的，如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

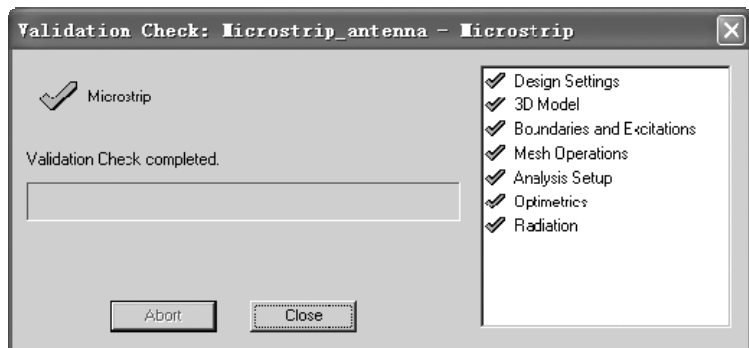



图 9-28 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树的“Analysis”节点下的求解设置项“Setup1”上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 9-29 所示。

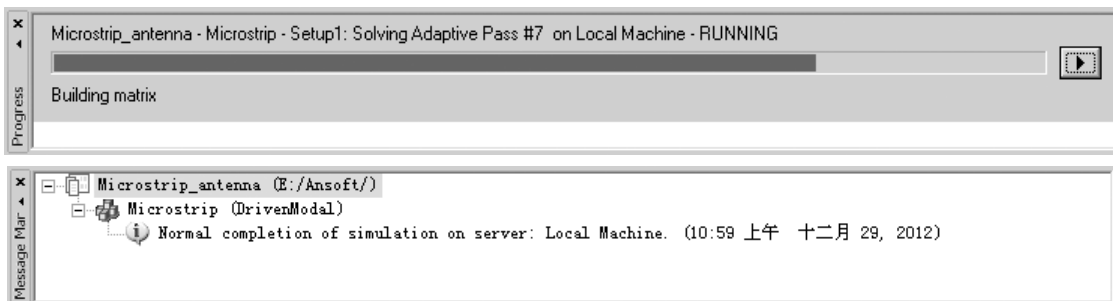


图 9-29 仿真分析进程窗口和信息管理窗口

## 9.2.6 查看仿真分析结果

### 1. 查看计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 9-30 所示，打开如图 9-31 左图所示的“Solutions”对话框；然后切换至“Convergence”选项卡，在显示方式“View”项处分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

由图 9-31 右图可知，求解计算在迭代到第 10 次时达到了收敛要求，因此后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后，求解还没有收敛，则需要进一步增加迭代次数，继续进行计算，直到收敛为止。

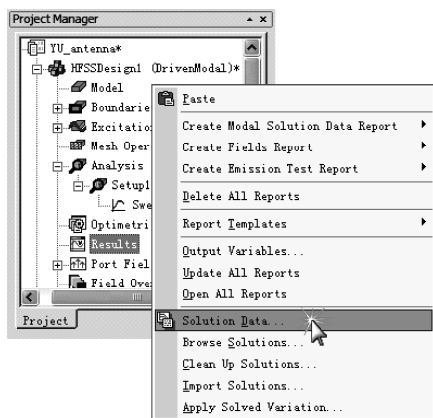


图 9-30 选择查看求解数据命令



图 9-31 迭代收敛情况图表报告

## 2. 查看天线的频带特性

天线的频带特性可以通过查看激励端口  $S_{11}$  的扫频分析结果和电压驻波比来得到。首先用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开如图 9-32 所示的“Report”对话框。

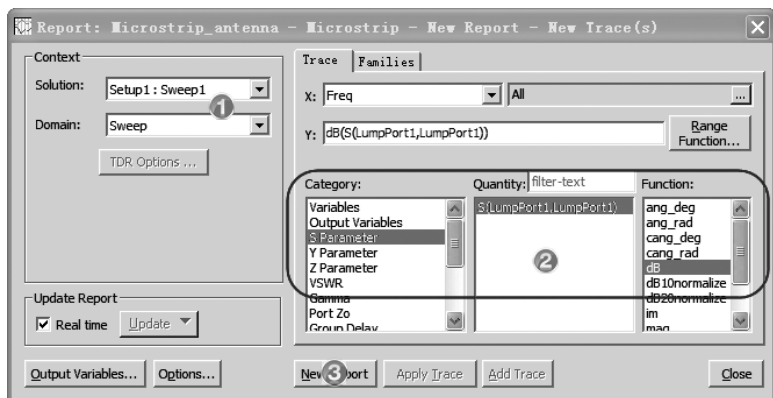


图 9-32 “Report”对话框

在“Report”对话框的“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成  $S_{11}$  扫频报告图形，再单击“Close”按钮关闭对话框，生成的图形如图 9-33 所示。

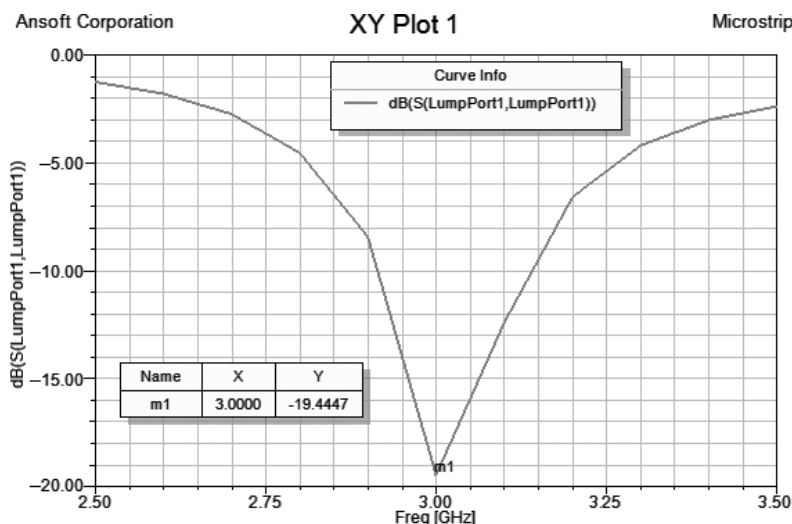



图 9-33 天线  $S_{11}$  的参数扫频曲线

在图形结果窗口中单击鼠标右键，选择“Marker→Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，标注出  $S_{11}$  曲线的最小值点。从图 9-33 中可以看出，当频率为 3GHz 时， $S_{11}$  最小，其最小值为-19.4dB。

重复以上步骤，不同的是在“Category”栏中选择参数类型为 VSWR，在“Function”栏中选择<none>，然后单击“New Report”按钮生成电压驻波比（VSWR）扫频报告图形，再单击“Close”按钮关闭对话框。同样标注出最小值点及 3GHz 处的驻波比，生成的图形如图 9-34 所示。

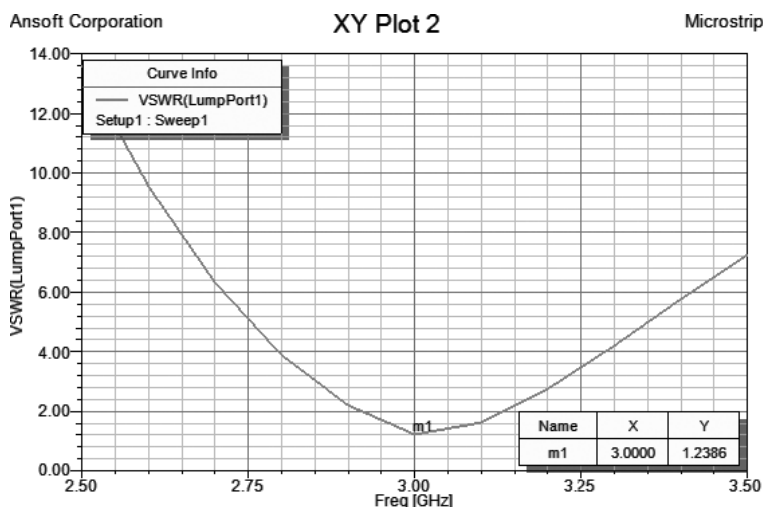


图 9-34 电压驻波比曲线

由图 9-34 可见，天线在谐振点 3GHz 时的 VSWR 小于 1.25，满足工程应用要求。

### 3. 天线的三维增益方向图

#### 1) 定义远场辐射球面

(1) 单击“HFSS→Radiation→Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”，弹出“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框，或者在工程管理树中点选“Radiation”节点，打开右键快捷菜单，选择其中的“Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令来打开该对话框，如图 9-35 所示。

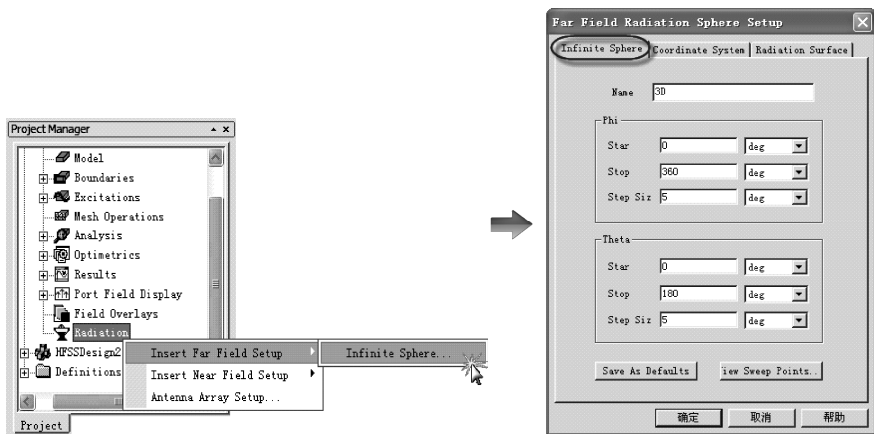


图 9-35 打开“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框

(2) 在“远场辐射球面设置”对话框的“Infinite Sphere”选项卡中,在“Name”文本框中输入新建辐射球面的名称为 3D,以便绘制远场三维方向图时选择该远场辐射计算球面。

(3) 指定辐射球面计算角度的范围:角度  $\theta$  的起始角度为 0deg,终止角度为 360deg,角度步长为 5deg;角度  $\varphi$  的起始角度为 0deg,终止角度为 180deg,角度步长为 5deg。设置时角度范围必须在 $-360^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间。单位既可以取度,也可以取弧度,HFSS 默认的单位为度。

(4) 其他选项卡的内容保持默认设置,单击“确定”按钮完成操作,定义的远场辐射球面 3D 会自动添加到工程管理树中的“Radiation”节点下。

## 2) 绘制三维增益方向图

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→3D Polar Plot”命令,打开如图 9-36 所示的“Report”对话框,确保“Geometry”项选择的是 3D,再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain,在“Quantity”栏中选择 GainTotal,在“Function”栏中选择 dB,然后单击“New Report”按钮生成天线三维远场增益方向图,最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

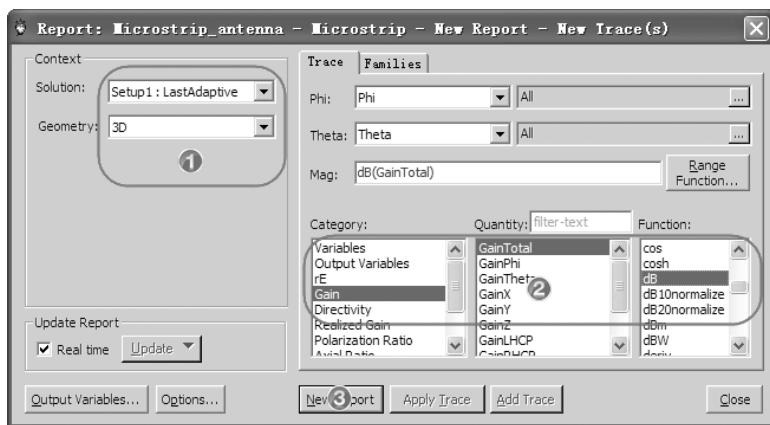


图 9-36 “Report”对话框

绘制的三维远场辐射增益方向图如图 9-37 所示。

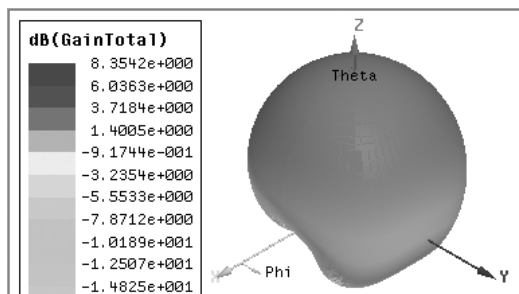


图 9-37 三维远场辐射增益方向图

从图 9-37 中可以看出，本章设计的矩形微带天线的最大辐射方向指向 Z 轴正方向，与理论分析的向参考地平面上方辐射的方向一致。最大辐射增益为 8.3dB 左右。

#### 4. 天线的二维增益方向图

下面查看一下天线远场在 XoZ 平面和 YoZ 切面上的二维方向图。首先定义远场辐射切面，该操作与定义远场辐射球面操作一样，不同的是设置计算角度范围为：角度  $\theta$  的起始角度为  $-180\text{deg}$ ，终止角度为  $180\text{deg}$ ，角度步长为  $1\text{deg}$ ；角度  $\varphi$  的起始角度为  $0\text{deg}$ ，终止角度为  $90\text{deg}$ ，角度步长为  $90\text{deg}$ ，这样就指定了 XoZ 和 YoZ 两个切面，最后在“Name”栏中输入名称 plane，如图 9-38 所示。

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→Radiation Pattern”命令，打开如图 9-39 所示的“Report”对话框，确保“Geometry”项选择的是 plane，再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain，在“Quantity”栏中选择 GainTotal，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成天线在 XoZ 和 YoZ 切面上的远场增益方向图，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

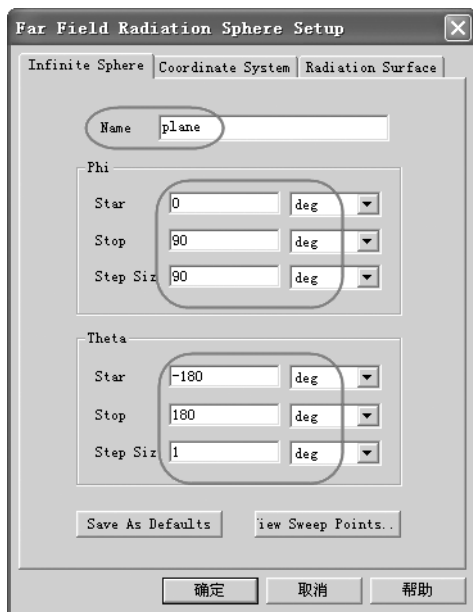


图 9-38 远场辐射切面设置对话框

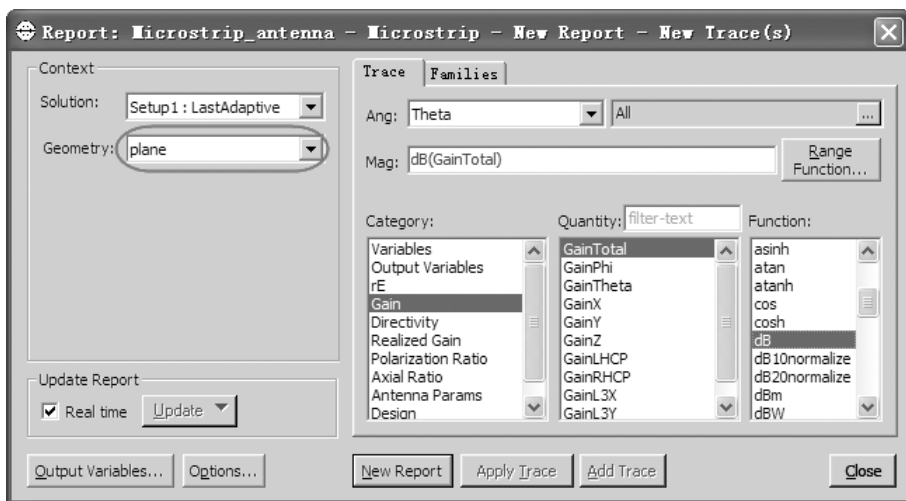



图 9-39 “Report”对话框

单击工具栏中的快捷命令按钮，分别标注出增益最大时的数值和两切面方向图开始不一致时的位置，绘制的二维远场辐射增益方向图如图 9-40 所示。

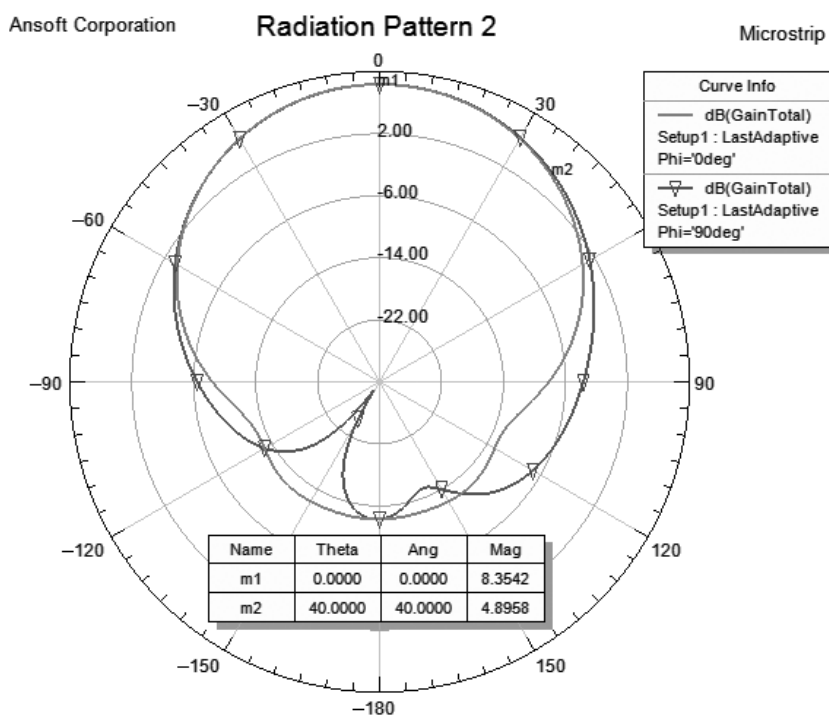


图 9-40 XoZ 和 YoZ 切面的二维远场辐射增益方向图

由图 9-40 可见, 天线的最大增益在  $Z$  轴的正前方, 最大增益为 8.35dB, 且两正交主平面方向图在  $\pm 40^\circ$  范围内保持了良好的一致性。

### 9.3 圆形微带天线设计实例

圆形微带天线的性能类似于 9.2 节讨论的矩形微带天线, 但在某些阵列的应用中, 圆形微带天线比其他结构的天线具有一定的优越性, 同时实验也证明圆形微带天线更容易调整以获得阻抗、辐射方向图和工作频率等方面的特性。对于圆形微带天线的辐射特性分析已经有许多的数学表达式和模型, 分析方法主要有简单腔体模型、有馈源的腔体模型、模式展开模型、导线网模型和格林函数法, 对应的复杂程度也越来越高, 这里就不一一详细列出了。下面通过简单腔体模型对圆形微带天线进行简要的分析, 最后介绍工程设计步骤和 HFSS 优化实现。

#### 9.3.1 圆形微带天线的理论分析

如图 9-41 所示, 基本的圆形微带天线是在介质基板上贴一薄导电圆形贴片而形成的, 基板的背面是地板, 天线单元通过同轴探针从底部进行馈电, 贴片半径为  $a$ 。基板内的电场基本上只有  $E_z$  分量, 磁场只有  $H_x$  和  $H_y$  分量, 即该电场为  $Z$  方向的 TM 场。而由于  $h \ll \lambda_0$ , 所以场沿  $Z$  方向不变, 并且微带边缘的法向分量趋于零, 因此微带与接地板之间的

空间可以等效为四周为磁壁、上下为电壁的谐振空腔。因此，在微带介质区域，对于  $TM_{mn}$  模的场可用解腔体问题的方法来确定。此时腔内只有  $TM_{mn}$  模式，能量集中在由贴片与接地板形成的介质腔中。根据腔模理论求解空腔内场，整理复数形式的麦克斯韦方程可以得到电场的标量方程：

$$(\nabla^2 + k^2)E_z = j\omega\mu_0 J_z \quad (9-6)$$

式中， $J_z$  为不随  $z$  变化的电流源，其他磁场分量可由  $E_z$  得到：

$$\begin{cases} H_x = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ H_y = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{cases} \quad (9-7)$$

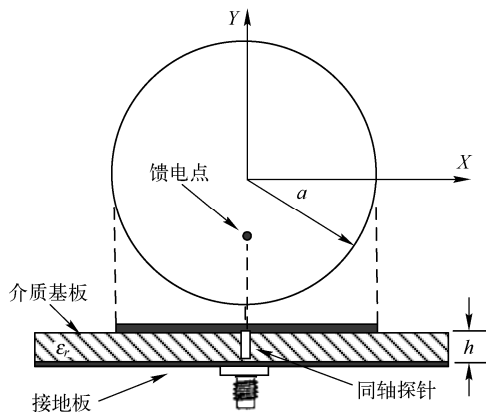


图 9-41 单馈点微带天线的结构示意图

式 (9-6) 可以用模展开法或模匹配法求解。对于模展开法，就是把解表示成各本征模的叠加，即

$$E_z = \sum_{m,n} A_{mn} \Psi_{mn} \quad (9-8)$$

$A_{mn}$  可根据激励条件确定为

$$A_{mn} = \frac{j\omega\mu_0}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{\langle J_z, \Psi'_{mn} \rangle}{\langle \Psi_{mn}, \Psi_{mn}^* \rangle} \quad (9-9)$$

其中  $\langle, \rangle$  定义的是内积运算：

$$\langle A(*), B(*) \rangle = \int_{\Omega} A(*)B(*)d\Omega \quad (9-10)$$

式中， $\Omega$  为  $A(*)$ 、 $B(*)$  的定义域，这样圆形微带天线内场的一般解就可以表示为

$$E_z = jk_0\eta_0 \sum_{m,n} \frac{1}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{\langle J_z, \Psi'_{mn} \rangle}{\langle \Psi_{mn}, \Psi_{mn}^* \rangle} \Psi_{mn} \quad (9-11)$$

其本征函数满足齐次波动方程及在磁壁处的边界条件：

$$(\nabla^2 + k_{mn}^2)\Psi_{mn} = 0, \quad \frac{\partial \Psi_{mn}}{\partial n} = 0 \quad (9-12)$$

将贴片坐标转换为极坐标，利用分离变量法求得本征函数和本征值方程为

$$\Psi_{mn} = C_{nm} J_n(k_{nm}\rho) \cos n\varphi, \quad k_{nm} = \frac{\chi'_{nm}}{a} \quad (9-13)$$

式中， $\chi'_{nm}$  是满足贝塞尔函数的导数为零的值。

采用同轴馈电时，馈源位于  $(\rho_0, 0)$  处，根据惠更斯原理，可以用一个由底面流向顶部的电流圆柱带等效。忽略磁流的贡献，电流圆柱可认为是沿宽度方向铺开并具有等效宽度的均匀电流带，即为一位于  $(\rho_0, 0)$  处的  $\varphi$  向宽度为  $\varphi_w$ ，电流沿  $z$  轴方向的电流片，其宽度可取同轴内导体直径，总电流为  $I_0$ ，电流密度为





$$J_z = I_0 f(\varphi) \frac{\delta(\rho - \rho_0)}{\rho \varphi_\omega}, \quad f(\varphi) = \begin{cases} 1, & |\varphi| \leq \frac{\varphi_\omega}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9-14)$$

由此, 可以根据式 (9-11) 得到内场表达式, 为

$$E_z = \sum_{m,n} B_{nm} J_n(k_{nm} \rho) \cos n\varphi \quad (9-15)$$

$$B_{nm} = j k_0 \eta_0 I_0 \frac{J_n(k_{nm} \rho_0) \delta_{0n} j_0 \left( \frac{n \varphi_\omega}{2} \right)}{(k^2 - k_{nm}^2) \pi a'^2 J_n^2(k_{nm} a') \left[ 1 - \frac{n^2}{(k_{nm} a')^2} \right]} \quad (9-16)$$

式中,  $\delta_{0n}$  为聂曼 (Neuman) 数,  $\delta_{0n} = \begin{cases} 2, & n \neq 0 \\ 1, & n = 0 \end{cases}$ ;  $a'$  为圆形微带天线的等效半径, 它与物理半径  $a$  的转换关系为  $a' = a \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a \varepsilon_r} \left( \ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right)}$ ;  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi$ ;  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ ;  $k = k_0 \times \sqrt{\varepsilon_r (1 - j \tan \delta)}$ ,  $\tan \delta$  为介质损耗角正切;  $j_0(x) = \sin x / x$ , 它通常工作于主模条件下。

一旦求得内场, 便可应用等效原理, 利用公式  $\overline{M}_s = -\overline{e}_n \times \overline{e}_z E_z$  来得到圆盘空腔周边的等效磁流密度。由  $\overline{M}_s$  的表达式可求出磁流在远区产生的场。其方向性函数可表示为

$$\begin{cases} f_{E_\theta} = [J_{n+1}(k_0 a' \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a' \sin \theta)] \cos n\varphi \\ f_{E_\varphi} = [J_{n+1}(k_0 a' \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a' \sin \theta)] \cos \theta \sin n\varphi \end{cases} \quad (9-17)$$

对于主模  $\text{TM}_{11}$  模式, 两个主平面, 即  $E$  面 ( $\varphi=0^\circ$ ) 和  $H$  面 ( $\varphi=90^\circ$ ) 的方向函数为

$$\begin{cases} f_E(\theta) = J_2(k_0 a' \sin \theta) - J_0(k_0 a' \sin \theta) \\ f_H(\theta) = [J_2(k_0 a' \sin \theta) + J_0(k_0 a' \sin \theta)] \cos \theta \end{cases} \quad (9-18)$$

输入阻抗为

$$Z_{in} = j k_0 \eta_0 h \sum_{m,n} \frac{J_n^2(k_{nm} \rho_0) \delta_{0n} j_0^2 \left( \frac{n \varphi_\omega}{2} \right)}{(k_{nm}^2 - k_{eff}^2) \pi a'^2 J_n^2(k_{nm} a') \left[ 1 - \frac{n^2}{(k_{nm} a')^2} \right]} \quad (9-19)$$

式中,  $k_{eff} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r (1 - j/Q)}$ 。

由此可以设计圆形微带天线的辐射特性和阻抗特性。

工作在  $\text{TM}_{nm}$  模式状态下的圆形天线的谐振频率可由下式计算:

$$f_0 = \frac{K_{nm} c}{2\pi a_e \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (9-20)$$

式中,  $K_{nm} (=ka)$  是  $n$  阶贝赛尔函数导数的第  $m$  个零点;  $c$  是自由空间的光速。

为把辐射单元的边缘场影响考虑进去，引入了等效半径  $a_e$ ，它与天线圆形贴片实际半径的关系为

$$a_e = a \left[ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left( \ln \frac{\pi a}{2h} + 1.7726 \right) \right]^{1/2} \quad (9-21)$$

### 9.3.2 HFSS 仿真设计概述

本节设计的圆形微带天线的工作中心频率为 5.5GHz，介质基板高度  $h=1.6\text{mm}$ ，相对介电常数为 2.5。利用 9.2 节中矩形微带天线的仿真设计思路，下面首先计算圆形微带天线的谐振频率对应的圆形贴片半径。由于圆形微带天线的输入阻抗表达式比较烦琐，所以对于馈电点位置及阻抗匹配问题，将利用 HFSS 的参数扫描分析和优化设计来实现。

圆形微带天线的 HFSS 仿真模型如图 9-42 所示。参考地平面和圆形微带贴片使用二维平面模型来代替，并施加理想导体边界条件来模拟理想薄导体。模型最下面为参考地平面，为  $32\text{mm} \times 32\text{mm}$  的正方形；之上为介质基板，为  $24\text{mm} \times 24\text{mm} \times 1.6\text{mm}$  的正方形，相对介电常数为 2.5；介质基板上为圆形微带贴片，利用式 (9-20)、式 (9-21) 计算得到贴片的半径  $a=9.3\text{mm}$ ；半径为  $0.5\text{mm}$  的馈电探针穿过介质基板至微带贴片，在参考地平面馈电探针的位置开一个半径为  $1.5\text{mm}$  的孔以设置端口激励。最后在整个模型外部用一个  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$  的长方形空气腔包围，并设置辐射边界条件。

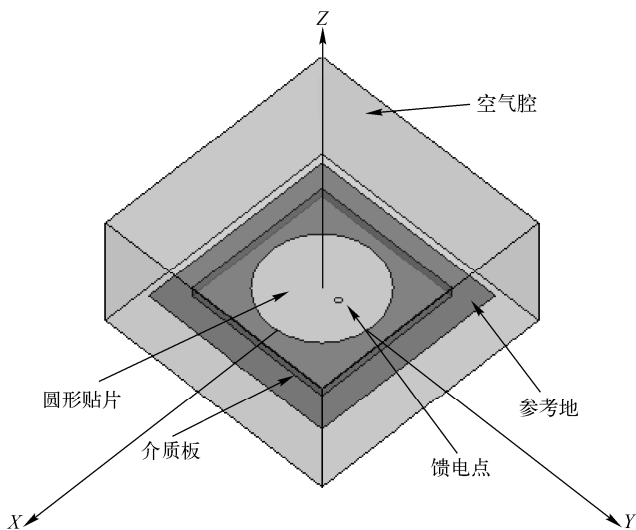


图 9-42 圆形微带天线的 HFSS 仿真模型

HFSS 仿真的相关设置如下。

- (1) 求解类型：模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位：毫米 (mm)。
- (3) 边界条件：辐射边界条件、理想导体边界条件。
- (4) 激励类型：集总端口激励。

(5) 求解及扫频设置：求解频率为 5.5GHz，扫频范围为 5~6GHz。

(6) 查看参数： $S$  参数扫频曲线、VSWR、天线方向图。

下面介绍详细的仿真设计过程。

### 9.3.3 创建工程设计

#### 1. 新建工程设计并保存


选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件，如图 9-43 所示。



图 9-43 启动 HFSS 软件

当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Circle\_MicroStrip。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 Circle\_MicroStrip\_Antenna.HFSS，如图 9-44 所示。

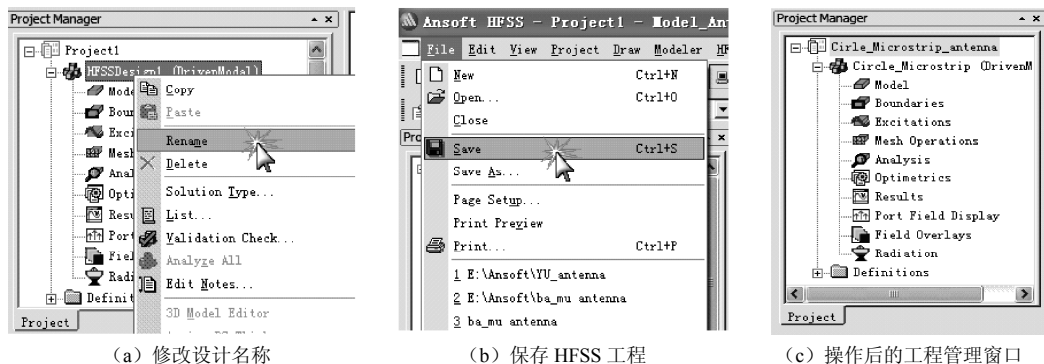


图 9-44 创建并保存新工程

#### 2. 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出

的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 9-45 所示。

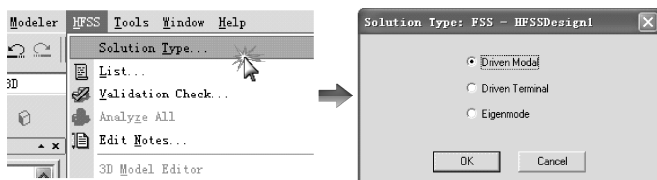


图 9-45 设置求解类型

### 3. 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”项，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 9-46 所示。

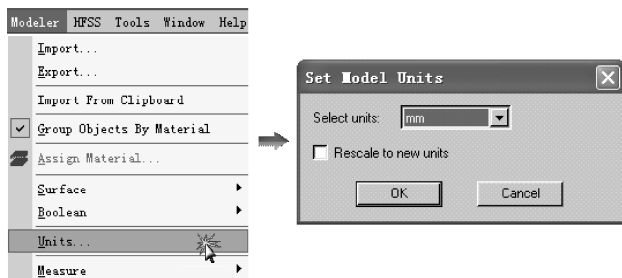


图 9-46 设置模型尺寸单位

### 4. 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中，选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，如图 9-47 所示。

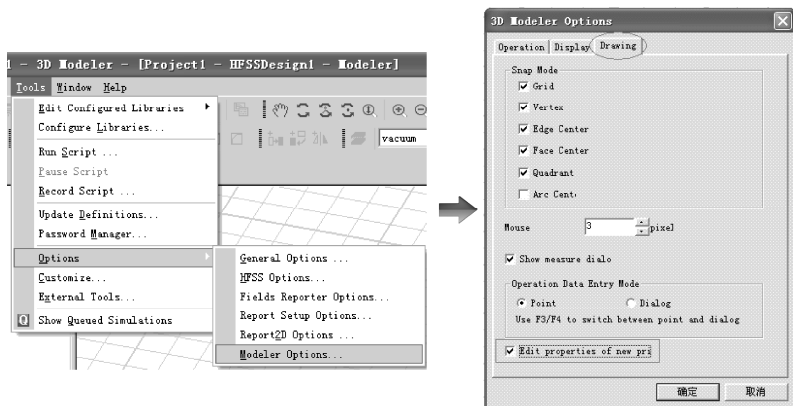


图 9-47 设置“3D Modeler Options”对话框

勾选此项目的目的是为了在进行建模操作过程中，创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动

弹出模型的“属性”对话框，用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令，分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

### 9.3.4 创建圆形微带天线的仿真模型

#### 1. 定义设计变量

为了进行参数建模，在建模之前需要定义相关的模型参数变量。根据 9.3.2 节的计算结果，相关的设计变量有：圆形贴片半径  $a=9.3\text{mm}$ ，参考地边长  $LD=32\text{mm}$ ，介质基板边长  $LS=24\text{mm}$ ，高度  $h=5\text{mm}$ ，馈电点距离中心坐标的初始距离  $\text{feed}=3\text{mm}$ 。

首先定义设计变量  $a=9.3\text{mm}$ 。在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的设计变量的“Properties”对话框中单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称  $a$ ，在“Value”栏中给变量赋值  $9.3\text{mm}$ ，最后单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量  $a$ 。变量定义步骤如图 9-48 所示。

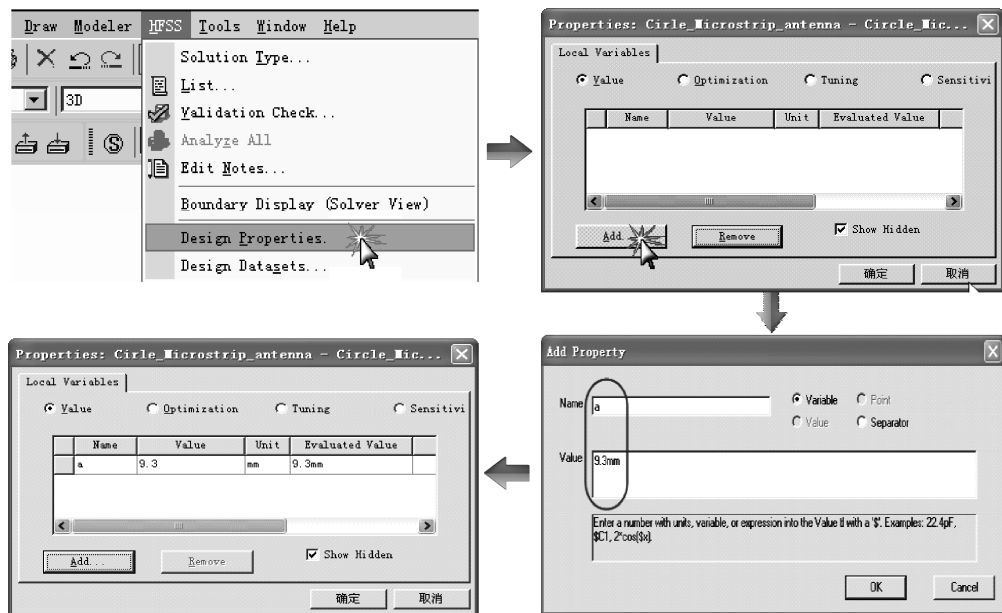


图 9-48 定义设计变量

继续单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称  $LD$ ，在“Value”栏中给变量赋值  $32\text{mm}$ ，最后单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量  $L$ 。

重复以上步骤添加其他设计变量，添加完成后的设计变量列表如图 9-49 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。

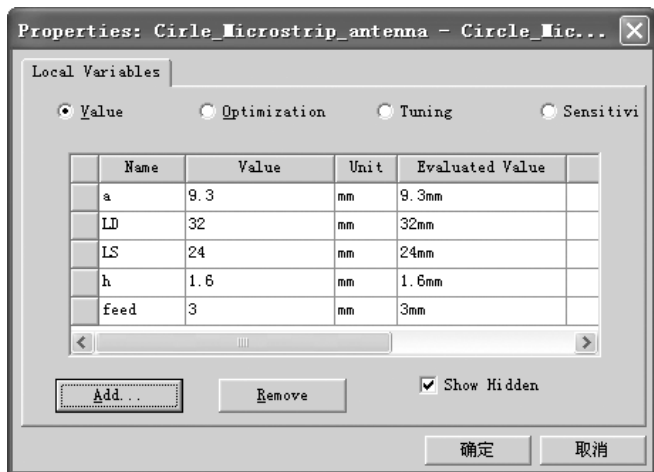



图 9-49 操作完成后的设计变量列表

## 2. 创建参考地平面

在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮, 执行矩形平面绘制命令后, 用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点, 然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后, 系统自动生成一个矩形平面, 其默认名称为 Rectangle1, 并弹出矩形平面的“属性”对话框。在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑, 具体操作为: “Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为  $-LD/2, -LD/2, 0mm$ ; 对称轴“Axis”项设为 Z; “XSize”设为 LD; “YSize”设为 LD; “Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 GND, 设置完成后的“属性”对话框如图 9-50 所示, 单击“确定”按钮完成操作。

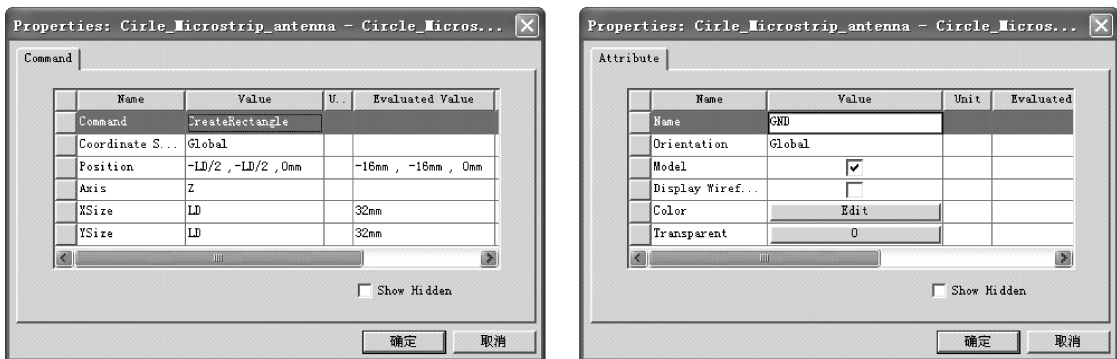


图 9-50 绘制任意矩形并修改“属性”对话框

参考地平面创建完成后, 在模型显示窗口选中 GND 平面, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Perfect E”命令, 打开“Perfect E Boundary”对话框, 将“Name”项改为 PerfE\_GND, 单击“OK”按钮完成操作 (如图 9-51 所示), 即给平面分配了理想导体边界条件, 这样就可以用来模拟理想薄导体了。

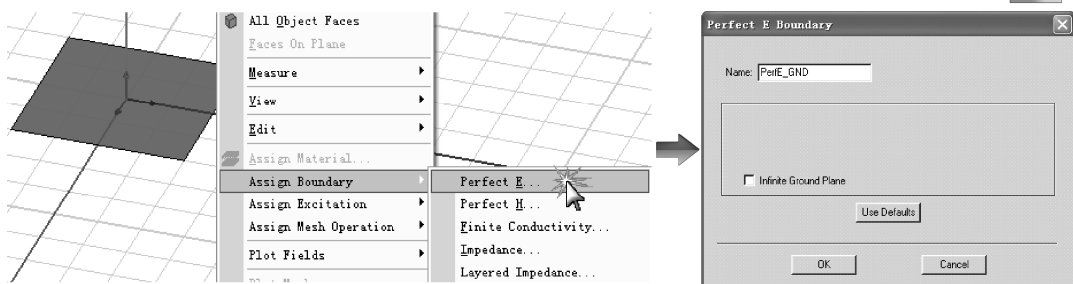



图 9-51 设置地平面 GND 为理想导体边界

### 3. 创建介质基板

(1) 选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 进入长方体模型创建状态。

(2) 在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。

(3) 在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为 $-LS/2$ 、 $-LS/2$ 、0mm，“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 LS、LS 和 h；单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Box1 改为 Substrate，单击“Transparent”项“Value”列中的按钮，调整滑块位置，将模型透明度设置为 0.6，其他选项保持默认设置不变，如图 9-52 所示。最后单击“确定”按钮完成介质基板的创建。

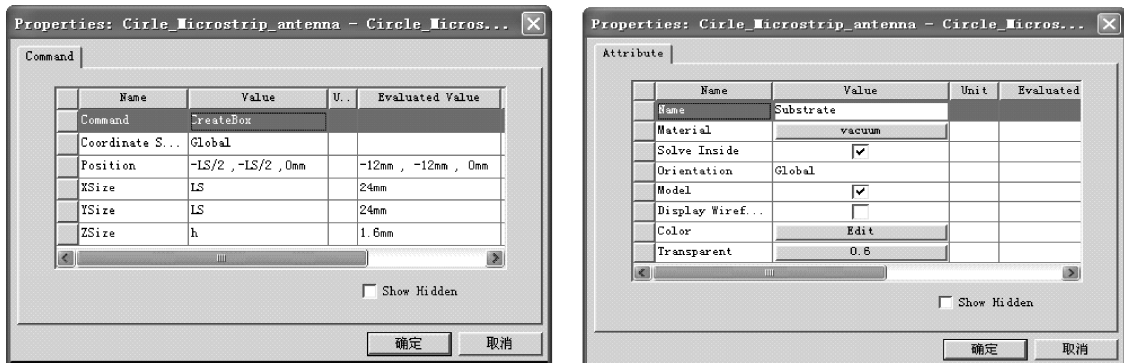


图 9-52 编辑好的介质基板的“属性”对话框

(4) 选中创建好的介质基板模型，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令，打开“属性”对话框，单击对话框右下角的“Add Material”按钮，打开新材料的“属性”对话框，默认新材料名称为 Material1，再在“Relative Permittivity”项对应的“Value”列输入新材料的相对介电常数 2.5，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 9-53 所示，返回上一级对话框，再单击“确定”按钮完成介质基板材料属性的设置，这样便给介质基板指定了新的材料属性，且新材料的相对介电常数为 2.5。

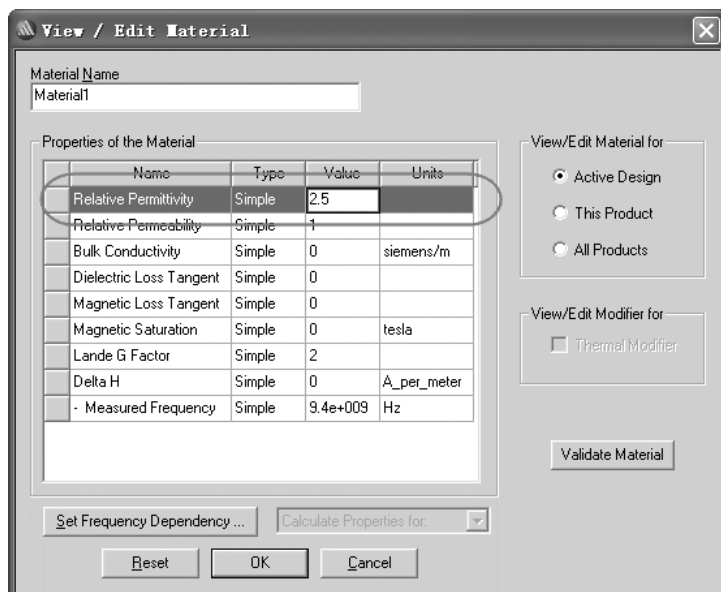


图 9-53 定义介质基板模型的新材料属性

按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角，再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-54 所示。

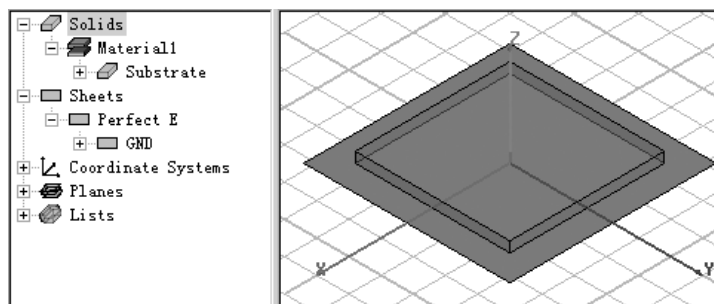



图 9-54 创建完介质基板后的模型

#### 4. 创建圆形微带贴片

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Circle”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆形平面模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态，第一步移动鼠标在工作平面任意点单击鼠标左键确定圆形平面中心位置，第二步移动鼠标在 xy 平面绘制出一个圆形后，在任意点单击鼠标左键确定圆形平面半径。这样任意一个圆形平面模型就创建完成了。

(3) 操作完成后，在生成圆形平面模型的同时，会自动弹出圆形平面模型的“属性”对话框，接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项，具体操作为：在“Command”选项卡中编辑圆形平面模型的位置尺寸属性，将中心点“Center Position”项修改为 0mm, 0mm，



h, 对称轴“Axis”项选为 Z 轴; 半径“Radius”项输入变量 a; 单击切换至“Attribute”选项卡, 将“Name”栏中的 Circle1 改为 Patch, “Color”项指定为绿色, 其他选项保持默认设置不变, 如图 9-55 所示。

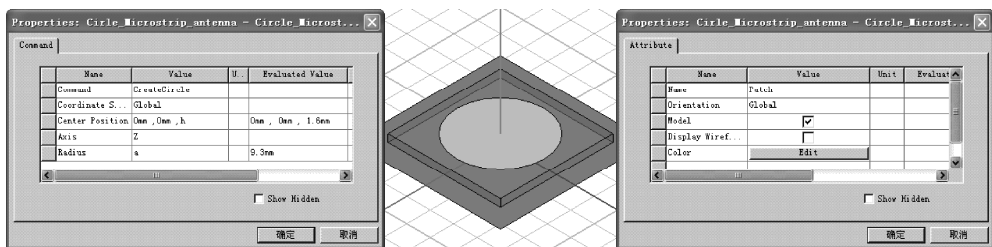


图 9-55 圆形微带贴片的“属性”对话框

(4) 圆形微带贴片创建完成后, 在模型显示窗口选中 Patch 平面, 然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Perfect E”命令, 打开“Perfect E Boundary”对话框, 将“Name”项改为 PerfE\_Patch, 单击“OK”按钮完成操作, 如图 9-56 所示, 即给平面 Patch 分配了理想导体边界条件, 这样就可以用来模拟理想薄导体微带贴片了。

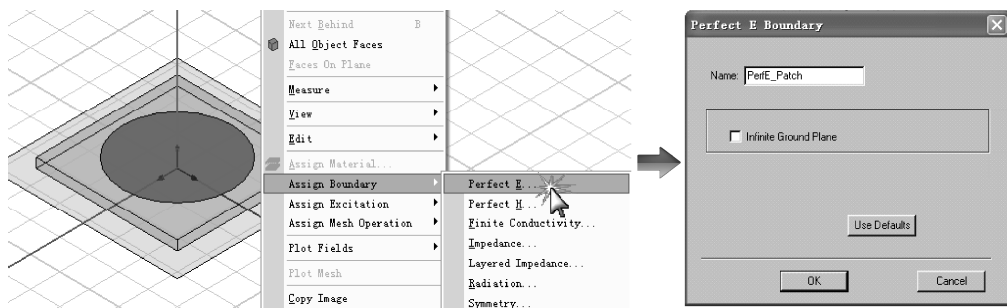



图 9-56 设置微带贴片 Patch 的理想导体边界

## 5. 创建同轴线馈电探针

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Cylinder”命令, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮 , 进入创建圆柱体模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态, 移动鼠标在工作平面上的任意点单击鼠标左键确定圆柱体的中心位置, 然后在 xy 平面绘制出一个圆形后, 在任意点单击鼠标左键确定圆柱体的半径, 再向 z 轴正方向移动鼠标, 绘制出圆柱体形状后, 在任意点单击鼠标左键确定圆柱体的高度。这样任意一个圆柱体模型就创建完成了。

(3) 操作完成后, 在生成圆柱体模型的同时, 会自动弹出圆柱体模型的“属性”对话框, 接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项, 具体操作为: 在“Command”选项卡中编辑圆柱体的位置尺寸属性, 将中心点“Center Position”项修改为 0mm, feed, 0mm, 对称轴“Axis”项选为 Z 轴, 半径“Radius”项输入 0.5mm, 高度“Height”项输入 h; 单击

切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Cylinder1 改为 feed，其他选项保持默认设置不变，如图 9-57 所示。

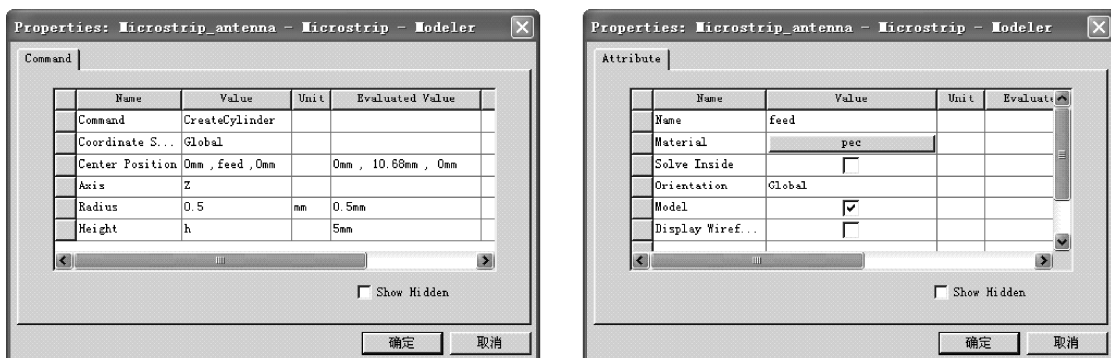


图 9-57 修改后的“Command”和“Attribute”选项卡

编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的馈电探针 feed，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

(4) 选中馈电探针模型 feed，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令，打开模型材料的“属性”对话框，选择探针的材料属性为 Pec，单击“确定”按钮关闭对话框，然后按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角，最后再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-58 所示。

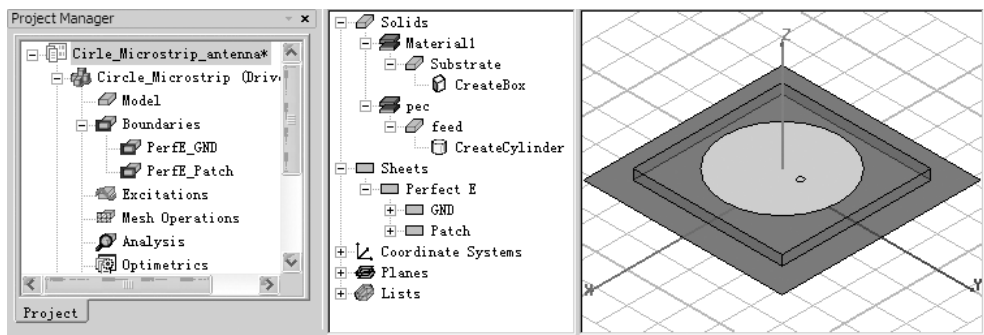



图 9-58 创建完馈电探针后的模型

### 9.3.5 设置激励及边界条件

#### 1. 设置集总端口激励

##### 1) 创建激励平面

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Circle”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆形平面模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态，第一步移动鼠标在工作平面的任意点单击鼠标左键确定圆

形平面中心位置，第二步移动鼠标在 xy 平面绘制出一个圆形后，在任意点单击鼠标左键确定圆形平面半径。这样任意一个圆形平面模型就创建完成了。

(3) 操作完成后，在生成圆形平面模型的同时，会自动弹出圆形平面模型的“属性”对话框，接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项，具体操作为：在“Command”选项卡中编辑圆形平面模型的位置尺寸属性，将中心点“Center Position”项修改为 0mm, feed, 0mm，对称轴“Axis”项选为 Z 轴，半径“Radius”项输入变量 1.5mm；单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Circle1 改为 port，其他选项保持默认设置不变，如图 9-59 所示。

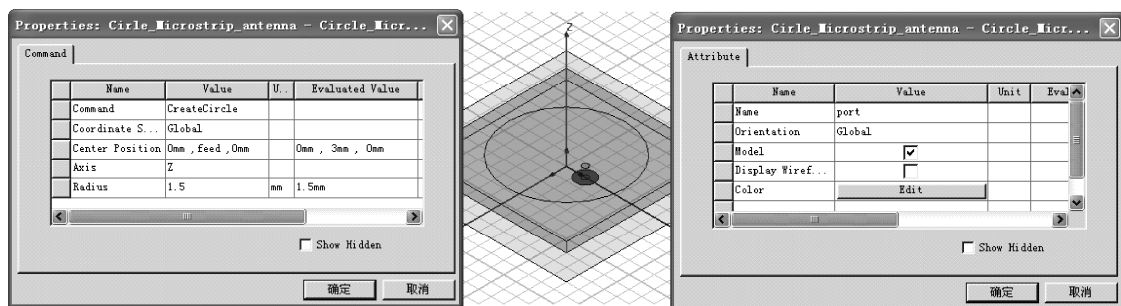



图 9-59 激励平面的“属性”对话框

编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的圆面模型 port，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

## 2) 从参考地平面中减去激励平面

由于参考地平面为理想导体边界，为使能量穿过参考地平面，为微带贴片提供激励，需要在参考地平面上开一个与端口激励平面等大小的孔。

按住键盘上的 Ctrl 键不放，在操作历史树的“Sheet”节点中先、后选取模型 GND 和 port，然后执行“Modeler Boolean subtract”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，弹出“Subtract”对话框，利用对话框中间的“-->”和“<--”按钮将 GND 移动到“Blank”栏中，将 port 移动到“Tool Parts”栏中，然后勾选对话框下面的“Clone Objects before subtracting”复选框，再单击“OK”按钮执行相减操作，如图 9-60 所示，这样就在参考地平面上开了一个与激励平面同样大小的孔，同时又保留了激励平面。

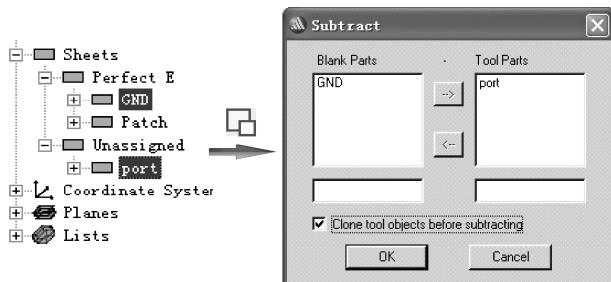


图 9-60 从参考地平面中减去激励平面

### 3) 设置集总端口激励

选择操作历史树中的“**Sheets**”节点中的 **port** 平面，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“**Assign Excitations Lumped port**”命令，打开“**Lumped Port**”对话框，首先在“**General**”标签页中默认激励名为 **LumpedPort1**，单击“**下一步**”按钮进入“**Modes**”标签页，在“**Number of**”项输入 1，在“**Integration Line**”列中单击鼠标左键，在弹出的下拉菜单中选择“**New Line...**”命令，进入绘制积分线状态，接着在 HFSS 界面的最底端状态栏中的“**X**”、“**Y**”和“**Z**”文本框中输入积分线的起始点坐标 (0,4.5,0)，然后按 **Enter** 键确定，在接下来出现的“**dX**”、“**dY**”和“**dZ**”文本框内分别输入 0, -1 和 0，再次按 **Enter** 键完成积分线的绘制。单击“**下一步**”按钮进入“**Post Processing**”标签页，选取默认设置，单击“**完成**”按钮结束激励的设置操作。设置完成后，在工程管理窗口的“**Excitations**”节点下会自动添加刚创建的 **LumpedPort1** 激励，单击并放大查看激励，如图 9-61 所示。

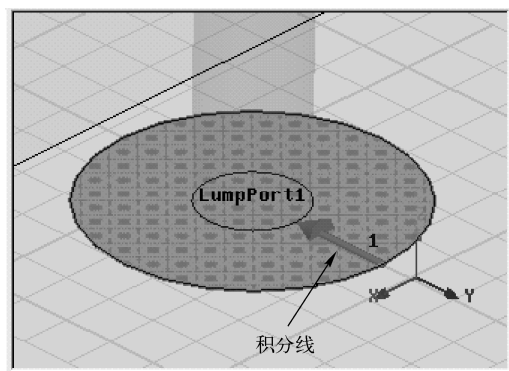



图 9-61 放大查看集总端口激励

## 2. 设置辐射边界条件

### 1) 创建辐射空气腔

(1) 选择绘制长方体命令“**Draw→Box**”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 进入长方体模型创建状态。

(2) 在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。

(3) 在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“**Command**”选项卡的中心点位置设为 -20mm, -20mm, -5mm; “**XSize**”、“**YSize**”和“**ZSize**”项分别输入 40mm、40mm 和 20mm; 单击切换至“**Attribute**”选项卡，将“**Name**”栏中的 **Box1** 改为 **air**，单击“**Transparent**”项“**Value**”列中的按钮，调整滑块位置，将模型透明度设置为 0.8，其他选项保持默认设置不变，如图 9-62 所示。最后单击“**确定**”按钮完成空气腔的创建。

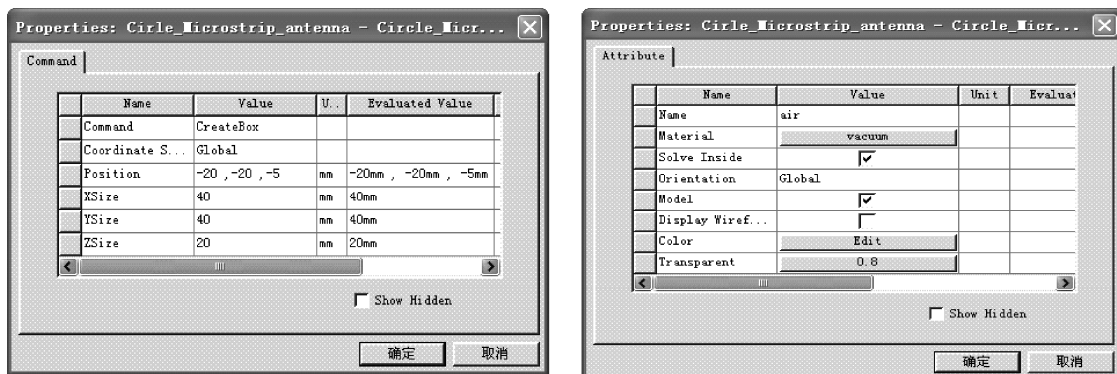


图 9-62 编辑好的空气腔“属性”对话框

## 2) 设置辐射边界条件

选中创建好的空气腔模型 air，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Radiation...”命令，打开“Radiation boundary”设置对话框，保持默认设置，再单击“OK”按钮完成操作，在工程管理树的“Boundaries”节点下便会自动添加辐射边界 Rad1。

到此就完成了圆形微带天线仿真模型的创建工作，再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 9-63 所示。

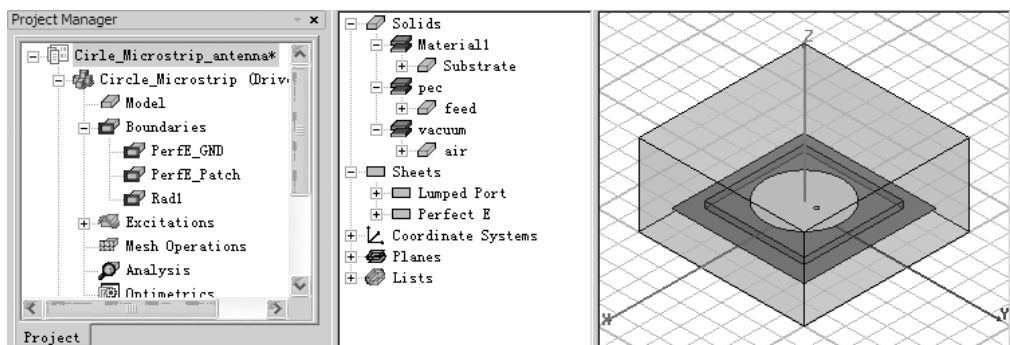



图 9-63 创建完成的仿真模型

## 9.3.6 仿真的基本设置

### 1. 求解设置

本节设计的圆形微带天线的工作中心频率在 5.5GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 5.5GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 9-64 所示的“Solution Setup”对话框。

(2) 在“Solution Setup”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 5.5GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并被自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下。

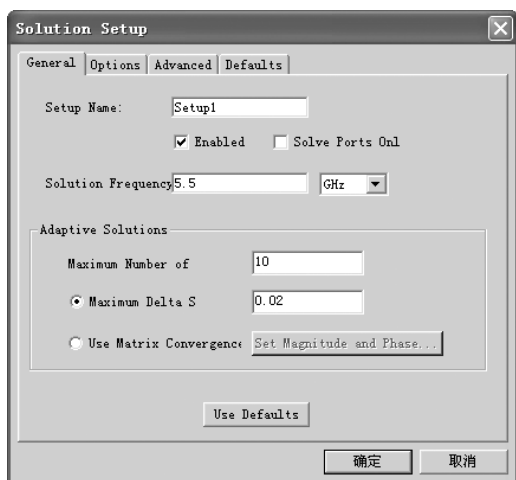



图 9-64 “Solution Setup”对话框

## 2. 扫频设置

为了了解天线在中心频点附近的工作情况，还需要添加一个 5~6GHz 的扫频设置，用以分析天线在此频段内的电压驻波比等参数。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 9-65 所示的“Edit Sweep”对话框。

(2) 在“Edit Sweep”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择快速扫频 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 5GHz，终止频率为 6GHz，步进长度为 0.05GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，则在右侧的频率列表中便会显示扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下，如图 9-66 所示。

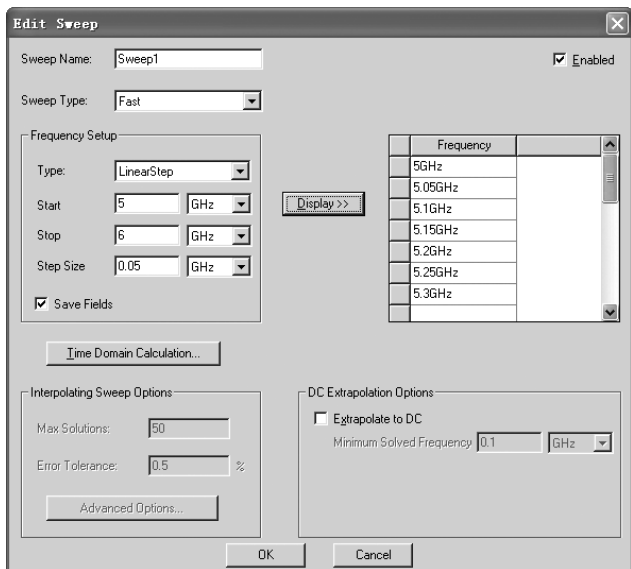




图 9-65 “Edit Sweep”对话框




图 9-66 求解的相关设置

## 3. 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了，但一般在进行正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口，如图 9-67 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完

整、正确和有效的；如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

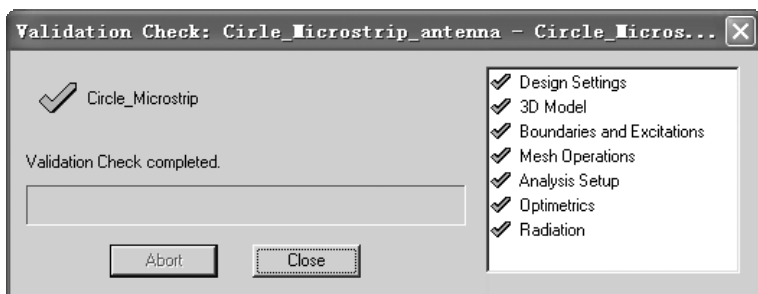



图 9-67 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树的“Analysis”节点下的求解设置项 Setup1 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 9-68 所示。

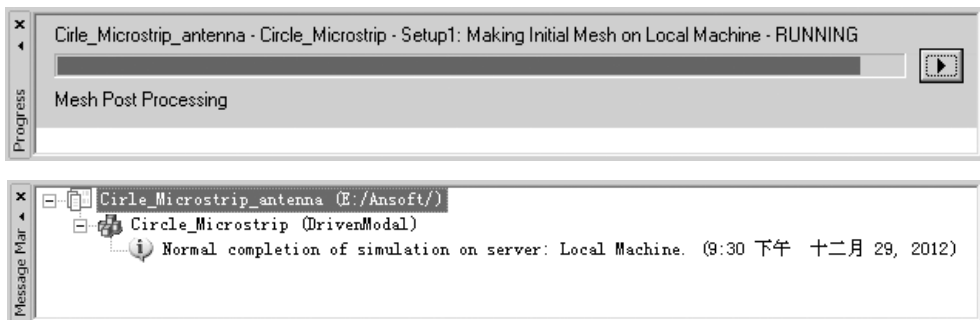


图 9-68 进程窗口和信息管理窗口

### 9.3.7 查看仿真分析结果

#### 1. 查看计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在打开的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 9-69 所示，打开如图 9-70 左图所示的“Solutions”对话框，然后点选切换至“Convergence”选项卡，并在显示方式“View”项中分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

由图 9-70 右图可见，求解计算在迭代到第 10 次时达到了收敛要求，因此其后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后，求解还没有收敛，则需要进一步增加迭代次数，继续进行计算，直到收敛为止。

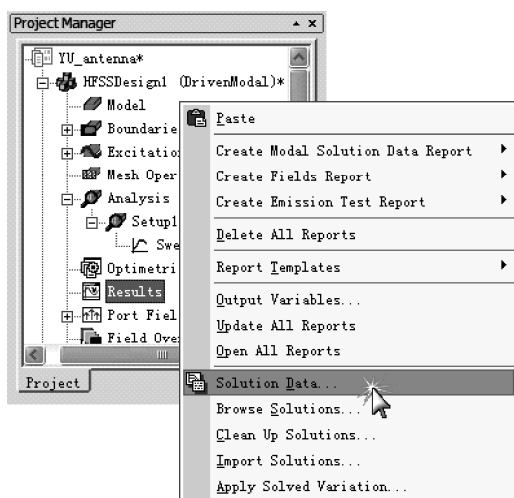


图 9-69 选择查看求解数据命令

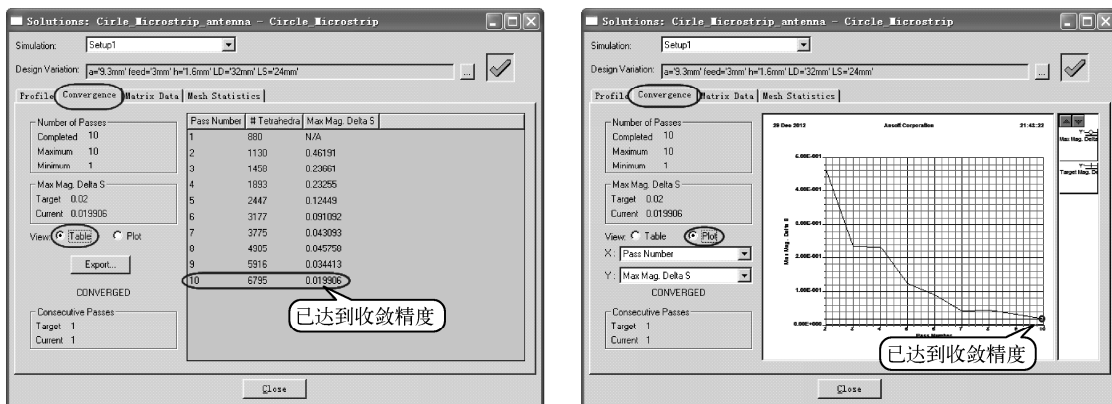



图 9-70 迭代收敛情况图表报告

## 2. 查看天线的频带特性

天线的频带特性可以通过查看激励端口 S11 的扫频分析结果和电压驻波比来得到。首先用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开如图 9-71 所示的“Report”对话框。

然后在“Report”对话框的“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter，在“Function”栏中选择 dB，再单击“New Report”按钮生成 S11 扫频报告图形，最后单击“Close”按钮关闭对话框，生成的图形如图 9-72 所示。

在图形结果窗口中单击鼠标右键，选择“Marker→Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，标注出 S11 曲线的最小值点。从图中可以看出，当频率为 5.6GHz 时，S11 最小，其最小值为 -17dB。



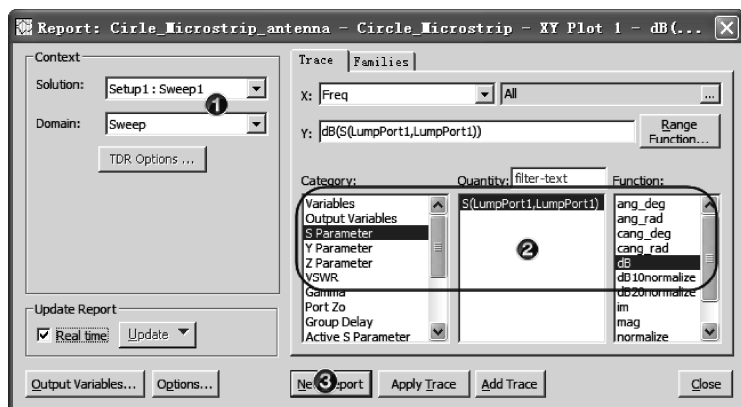
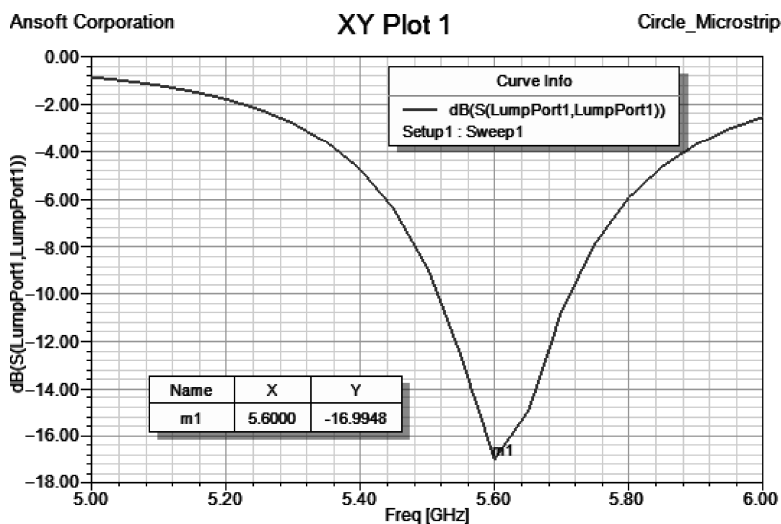


图 9-71 “Report”对话框

图 9-72 天线的  $S_{11}$  参数扫频曲线

### 9.3.8 优化设计

由图 9-72 中的天线的  $S_{11}$  参数扫频曲线可见，天线的谐振点位于 5.6GHz 处，这与我们期望的中心工作频率 5.5GHz 还存在一定的差距，因此还需要对设计进行优化，以达到天线谐振频率为 5.5GHz 的要求。

根据天线的原理和经验分析，天线谐振频率由圆形贴片的半径  $a$  决定，同时馈电点位置坐标  $feed$  也对天线频带特性有所影响，因此在进行优化之前，首先对这两个参数进行扫描分析，得到其对天线谐振频率的影响关系，然后有针对性地进行优化设计。

#### 1. 参数扫描分析

##### 1) 对圆形贴片半径变量 $a$ 进行扫描分析

首先添加一个参数扫描分析。

(1) 在工程管理树中的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add→Parametric”命令，弹出“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框，如图 9-73 所示。



图 9-73 “Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框

(2) 单击“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框右上角的“Add...”按钮，打开“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框，设置扫描变量。

(3) 在“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框的“Variable”项对应的下拉菜单中选择变量 a，并设置变量的起始值为 9mm，终止值为 10mm，步长为 0.2mm，编辑完成后单击中间的“Add>>”按钮，将其添加到右侧的变量列表中，设置后的对话框如图 9-74 所示，单击“OK”按钮完成操作返回上一级对话框。

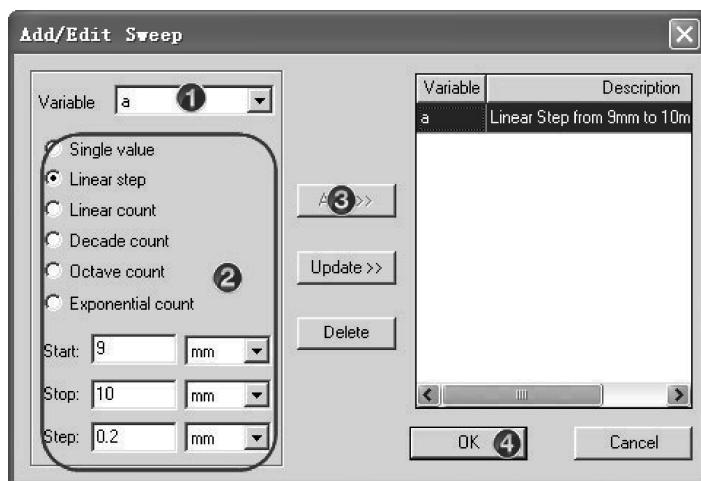


图 9-74 设置扫描分析变量 a

(4) 回到“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框后，会看到刚刚设置的扫描

变量已经添加到了变量列表中，保持其他选项卡的设置不变，单击对话框中的“确定”按钮完成扫描分析设置，操作完成后，名为 ParametricSetup1 的参数扫描分析会自动添加到工程树中的“Optimetrics”节点下。

(5) 执行参数扫描分析。在工程树中找到添加的扫描分析 ParametricSetup1，选中它并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，则变量  $a$  的扫描分析便开始运行。

(6) 查看分析结果。分析完成后，用鼠标右键单击工程树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，选择查看 S11 参数，再单击“New Report”按钮，绘制参数扫描扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭对话框，绘制的曲线如图 9-75 所示。

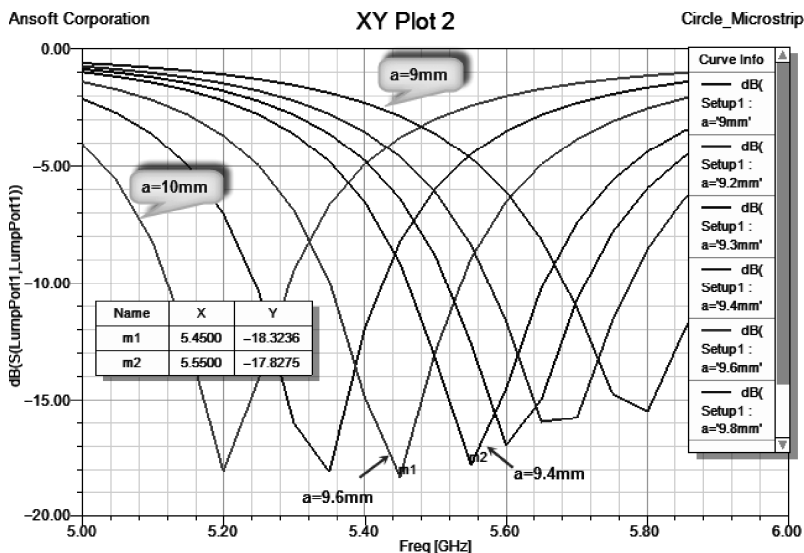


图 9-75 不同贴片半径对应的 S11 扫频曲线

从图 9-75 中可以看到，当其他变量固定时，圆形微带贴片的半径  $a$  越大，天线对应的谐振频率越低。当  $a=9.4\text{mm}$  时，天线谐振在  $5.55\text{GHz}$ ；当  $a=9.6\text{mm}$  时，天线谐振在  $5.45\text{GHz}$ 。由此可以得出结论：要想使天线谐振在  $5.5\text{GHz}$ ，微带贴片的半径应该在  $9.4\sim 9.6\text{mm}$  之间，这就为下一步进行优化设计提供了变量优化范围。

## 2) 对变量 feed 进行扫描分析

(1) 在工程树中的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add→Parametric”命令，弹出“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框。

(2) 单击“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框右上角的“Add...”按钮，打开“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框，设置扫描变量。

(3) 在“Add/Edit Sweep (添加/编辑变量)”对话框的“Valuable”项对应的下拉菜单中选择变量 feed，并设置变量的起始值为  $2\text{mm}$ ，终止值为  $4\text{mm}$ ，步长为  $0.5\text{mm}$ ，编辑完成后单击中间的“Add>>”按钮，将其添加到右侧的变量列表中，设置后的对话框如图 9-76 所示，单击“OK”按钮完成操作返回上一级对话框。

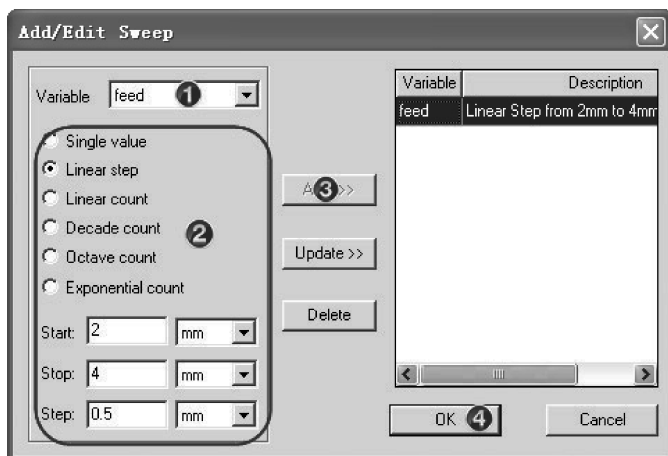


图 9-76 设置扫描分析变量 feed

(4) 回到“Setup Sweep Analysis (扫描分析设置)”对话框后，会看到刚刚设置扫描变量已经添加到了变量列表中，保持其他选项卡的设置不变，单击对话框中的“确定”按钮完成扫描分析设置。操作完成后，名为 ParametricSetup2 的参数扫描分析会自动添加到工程管理树中的“Optimetrics”节点下。

(5) 执行参数扫描分析。在工程管理树中找到添加的扫描分析 ParametricSetup2，选中它并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，运行扫描分析。

(6) 查看分析结果。分析完成后，用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，选择查看 S11 参数；切换至“Families”选项卡，在变量列表中指定变量 feed 的范围为 All，变量 a 的值为 9.3mm，单击“New Report”按钮，绘制参数扫描扫频曲线，单击“Close”按钮关闭对话框，绘制的曲线如图 9-77 所示。

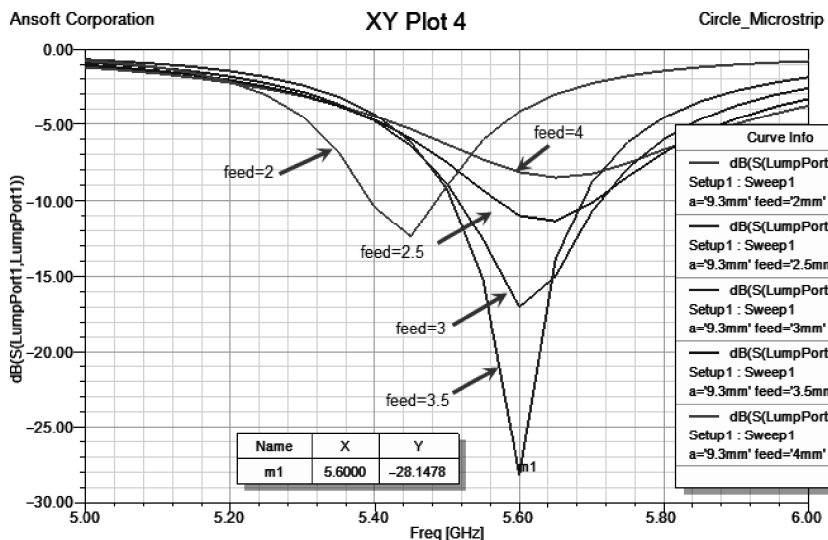


图 9-77 变量 feed 不同值时对应的 S11 扫频曲线

从图 9-77 中可以看到,天线的谐振频率随馈电点位置的不同变化不大。当  $\text{feed}=3.5\text{mm}$  时,天线的回波损耗最小。

## 2. 优化设计

通过上面的参数扫描分析,可知天线谐振频率与圆形微带贴片半径  $a$  密切相关,并且当  $a=9.5\text{mm}$  时,谐振在  $5.5\text{GHz}$  附近,从而使我们在进行优化设计时,只需对参数  $a$  在  $9.5\text{mm}$  附近进行优化即可,具体步骤如下。

(1) 指定优化变量。选择主菜单栏中的“HFSS→Design Properties”命令,打开设计变量列表,选择“Optimization”选项,在其中的变量列表中勾选变量  $a$  对应的“Include”栏,并输入变量的最小值“Min”为  $9.4$ ,最大值“Max”为  $9.6$ ,如图 9-78 所示,最后单击“确定”按钮完成操作,这样就将  $a$  指定为优化变量,其优化范围为  $9.4\sim 9.6\text{mm}$ 。

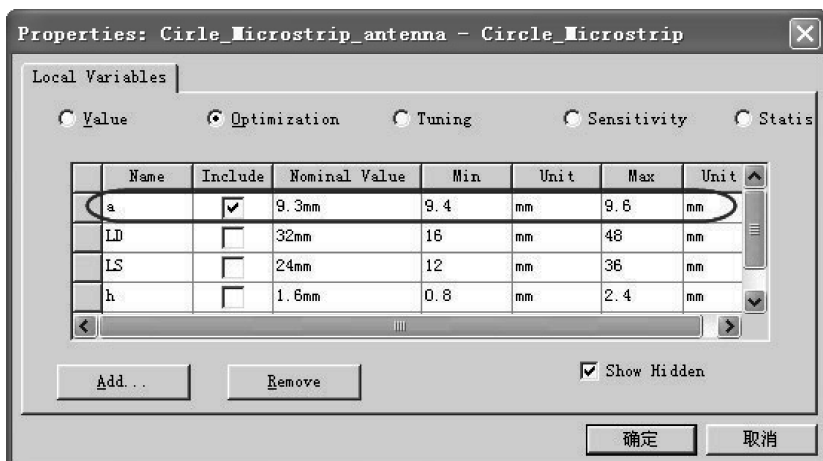


图 9-78 指定优化变量

(2) 添加优化设置。在工程管理树中的“Optimetrics”节点处单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Add→Optimization”命令,弹出“Setup Optimization (优化设置)”对话框。在该对话框的“Goals”选项卡下进行选择和设置:在“Optimizer”项选择 Sequential Nonlinear Programming;在“Max No.of Iterations”项输入 10;然后单击对话框左下角的“Setup Calculation”按钮,在弹出的“Add/Edit Calculation (添加/编辑计算式)”对话框中做如图 9-79 所示的设置。

设置完成后,单击对话框下面的“Add Calculation”按钮添加  $S_{11}$  为优化目标函数,再单击“Done”按钮返回“Setup Optimization (优化设置)”对话框,可以看到目标函数已经添加到 Cost 列表中。单击目标函数对应的“Condition”列,在其对应的下拉菜单中选择 Minimize,最后得到的“Setup Optimization (优化设置)”对话框的“Goals”选项卡如图 9-80 所示。

单击切换至“Variables”选项卡,在  $a$  对应的“Starting Value”栏中输入  $9.5$ ,然后单击“<<Advanced”按钮,则新增两项内容,分别在“Min Focus”栏和“Max Focus”栏中输入  $9.42$  和  $9.58$ ,如图 9-81 所示。

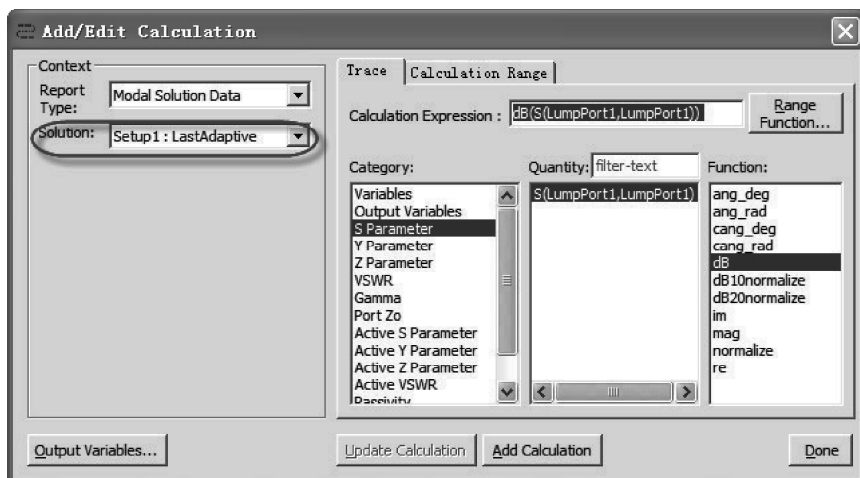


图 9-79 “Add/Edit Calculation (添加/编辑计算式)”对话框

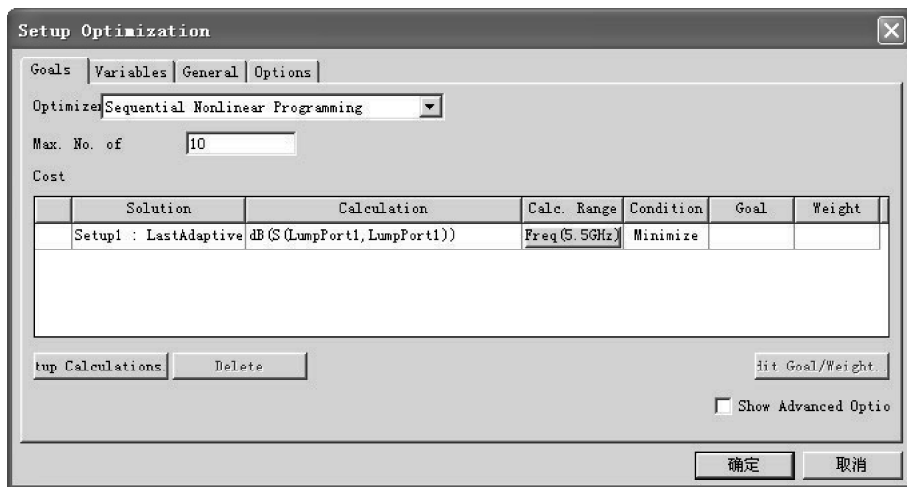


图 9-80 “Goals”选项卡

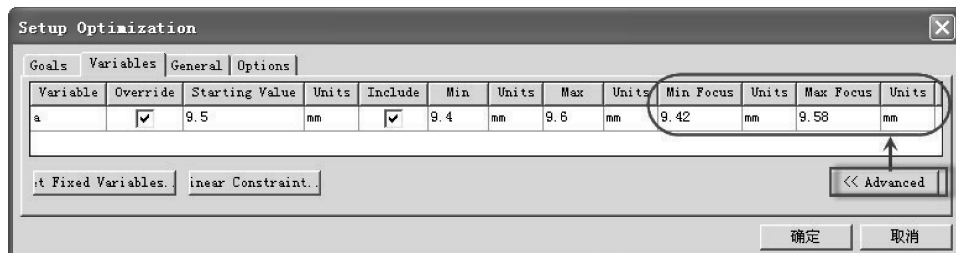


图 9-81 “Variables”选项卡

(3) 进行优化设计。优化设置完成后，一个名为 OptimizationSetup1 的优化设置项会自动添加到工程管理窗口的“Optimetrics”节点下。选中该项并单击鼠标右键，在弹出的快捷

菜单中选择“Analyze”命令，开始进行优化设计。

(4) 查看优化结果。优化过程需要一段时间，当所有的分析计算结束后，在工程管理树窗口单击优化设置项“OptimizationSetup1”，并弹出的快捷菜单，选择其中的“View Analysis Result”命令，弹出“Post Analysis Display”对话框，选择“Table”单选按钮，以数据列表的形式查看优化结果，如图9-82所示。

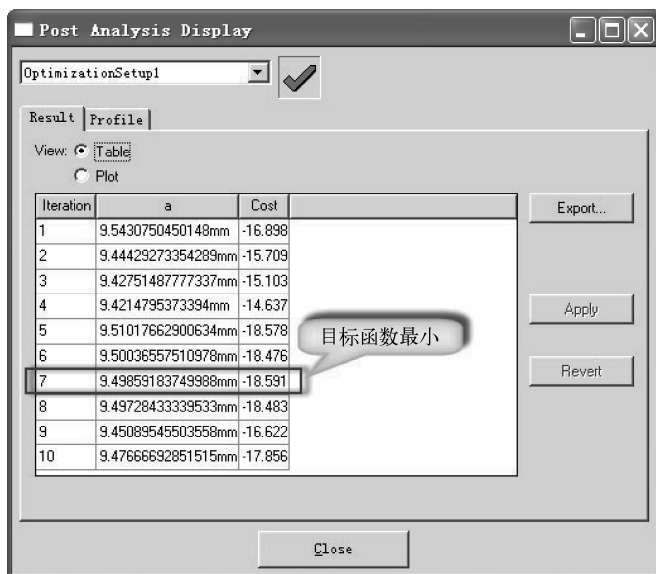


图9-82 优化分析结果数据

由图9-82可见，HFSS优化设计一共进行了10次迭代计算，其中第7次迭代计算的目标函数S<sub>11</sub>的数值最小，为-18.59，此时对应的变量a的值约为9.5mm。

选择主菜单栏中的“HFSS→Design Properties”命令，打开设计变量列表，将变量a的值改为9.5mm，然后在工程管理树中找到添加的扫描分析ParametricSetup2，选中它并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，再次运行扫描分析。分析后的S参数结果如图9-83所示。

由图9-83可见，当馈电点位于圆心2.5mm处时，天线的回波损耗最小。

### 9.3.9 应用并查看优化后的天线指标

下面就可以应用9.3.8节的优化数据重新分析计算仿真模型了。打开设计变量列表，将变量a设为9.5mm，变量feed设为2.5mm，设置完成后选择工程管理树中的“Analysis”节点下的“Setup1”项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analyze”命令，进行仿真计算。分析计算完成后，查看仿真数据结果。

#### 1. 天线的S<sub>11</sub>参数

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，在



“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter，在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成  $S_{11}$  扫频图形报告，再单击“Close”按钮关闭对话框，生成的图形如图 9-84 所示。

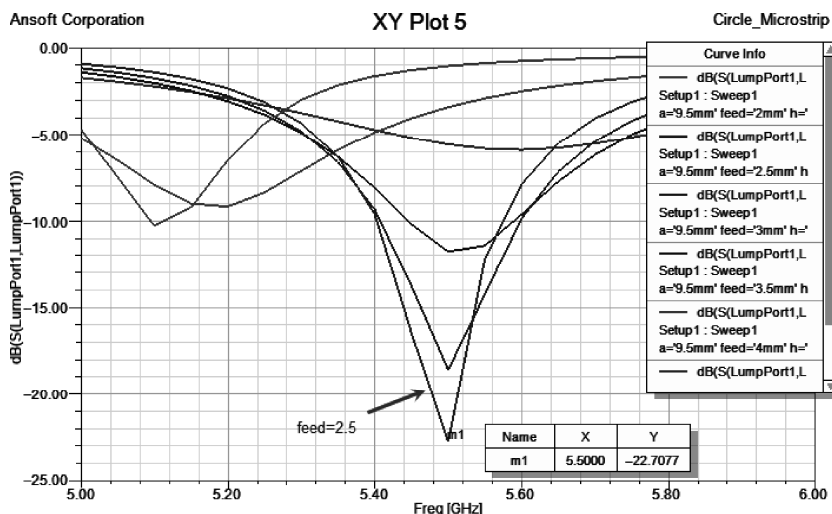


图 9-83 变量  $a=9.5\text{mm}$  时变量 feed 的参数扫描分析结果

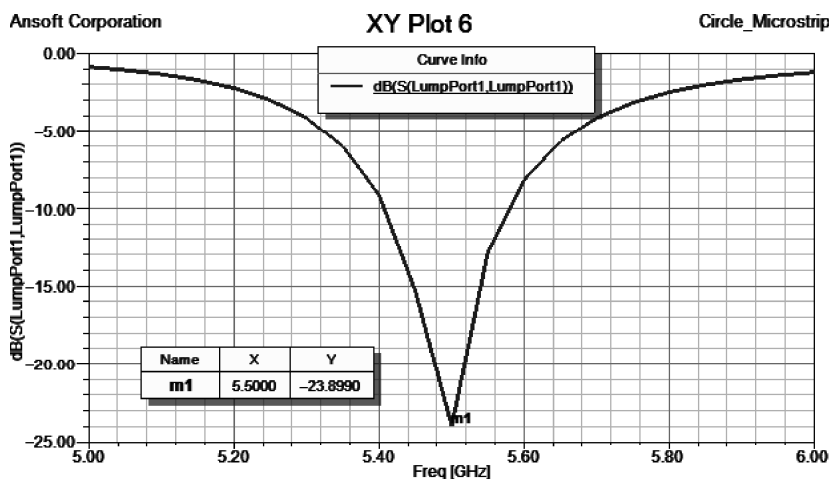



图 9-84 天线  $S_{11}$  参数的扫频曲线

在图形结果窗口中单击鼠标右键，选择“Marker→Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，标注出  $S_{11}$  曲线的最小值点。由图 9-84 可见， $S_{11}$  的最小值位于 5.5GHz 处，为 -23.9dB，实现了天线在 5.5GHz 时的谐振。

## 2. 天线的三维增益方向图

### 1) 定义远场辐射球面

(1) 选择“HFSS→Radiation→Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令，弹出



“Far Field Radiation Sphere Setup (远场辐射球面设置)”对话框, 或者在工程管理树中点选“Radiation”节点, 打开右键快捷菜单, 选择其中的“Insert Far Field Setup → Infinite Sphere...”命令来打开该对话框, 如图 9-85 所示。

(2) 在“Far Field Radiation Sphere Setup (远场辐射球面设置)”对话框的“Infinite Sphere”选项卡中, 在“Name”文本框中输入新建辐射球面的名称为 3D, 以便绘制远场三维方向图时选择该远场辐射计算球面。

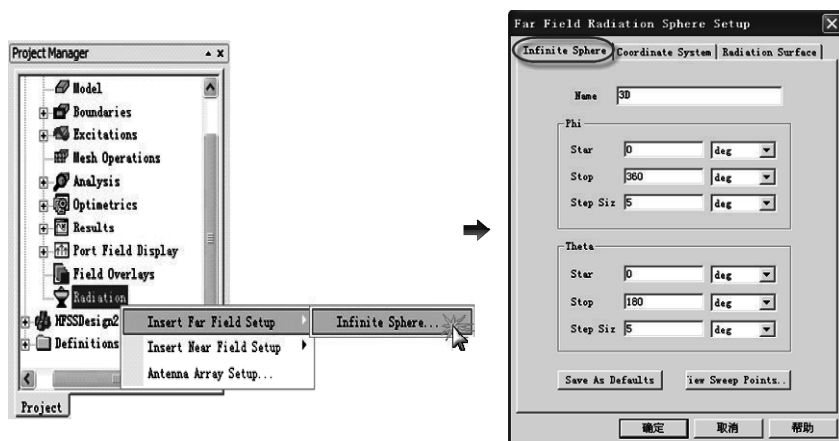


图 9-85 打开“远场辐射球面设置”对话框

(3) 指定辐射球计算角度的范围, 其中角度  $\theta$  的起始角度为 0deg, 终止角度为 180deg, 角度步长为 5deg; 角度  $\varphi$  的起始角度为 0deg, 终止角度为 360deg, 角度步长为 5deg。设置时角度范围必须在  $-360^\circ \sim 360^\circ$  之间。单位既可以取度, 也可以取弧度, HFSS 默认的单位为度。

(4) 其他选项卡的内容保持默认设置, 单击“确定”按钮完成操作, 定义的远程辐射球面 3D 会自动添加到工程管理树中的“Radiation”节点下。

## 2) 绘制三维增益方向图

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report → 3D Polar Plot”命令, 打开如图 9-86 所示的“Report”对话框, 确保“Geometry”项选择的是“3D”, 再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain, 在“Quantity”栏中选择 GainTotal, 在“Function”栏中选择 dB, 然后单击“New Report”按钮生成天线的三维远场增益方向图, 最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

绘制的三维远场辐射增益方向图如图 9-87 所示。

从图 9-87 中可以看出, 本章设计的圆形微带天线的最大辐射方向指向 Z 轴正方向, 最大辐射增益在 7.4dB 左右。

## 3. 天线的二维增益方向图

下面来查看一下天线远场在 XoZ 平面和 YoZ 切面上的二维方向图。首先定义远场辐射切面, 其操作与定义远场辐射球面操作一样, 不同的是设置计算角度的范围: 角度  $\theta$  的起始

角度为 $-180\text{deg}$ ，终止角度为 $180\text{deg}$ ，角度步长为 $1\text{deg}$ ；角度 $\varphi$ 的起始角度为 $0\text{deg}$ ，终止角度为 $90\text{deg}$ ，角度步长为 $90\text{deg}$ ，这样就指定了  $XoZ$  和  $YoZ$  两个切面，最后在“Name”栏中输入名称 plane，如图 9-88 所示。

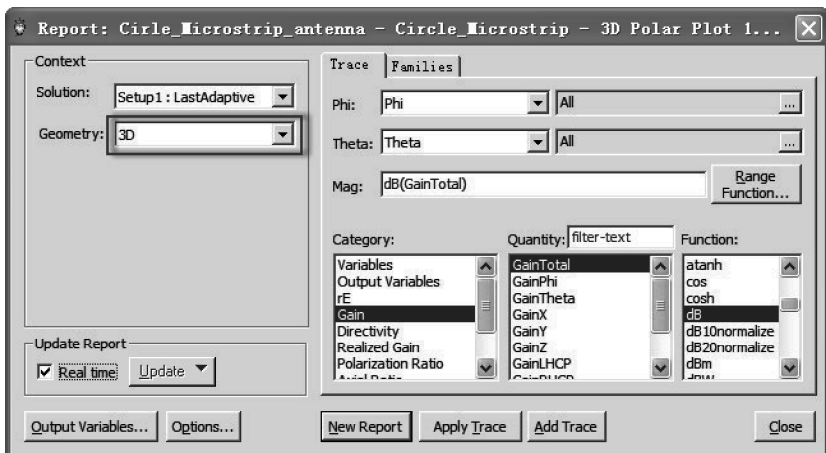


图 9-86 “Report”对话框

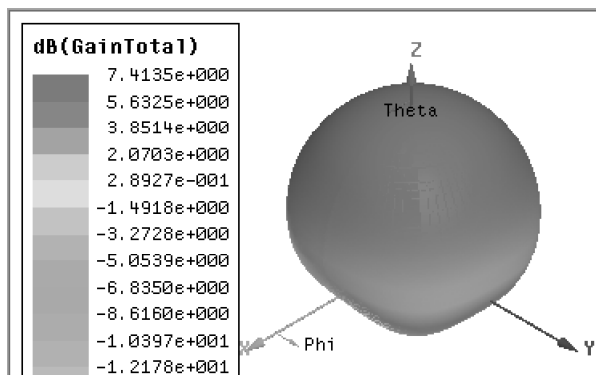



图 9-87 三维远场辐射增益方向图

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→Radiation Pattern”命令，打开如图 9-89 所示的“Report”对话框，确保“Geometry”项选择的是“Plane”，再在“Category”栏中选择参数类型为 Gain；在“Quantity”栏中选择 GainTotal；在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成天线在  $XoZ$  和  $YoZ$  切面上的远场增益方向图，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

单击工具栏中的快捷命令按钮，分别标注出增益最大时的数值和两切面方向图开始不一致时的位置，由此绘制出的二维远场辐射增益方向图如图 9-90 所示。

由图 9-90 可见，天线的最大增益在  $Z$  轴正前方，最大增益为  $7.4\text{dB}$ ，两正交主平面方向图保持了良好的一致性。

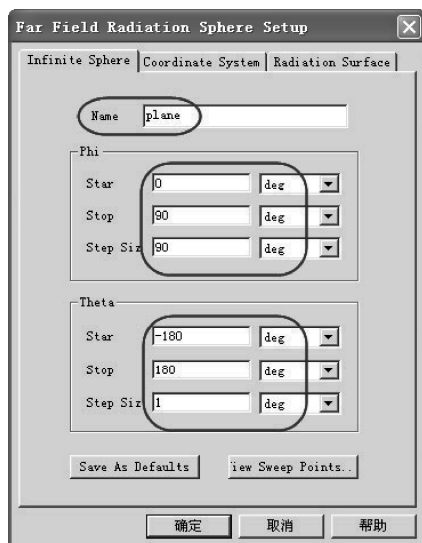


图 9-88 “Far Field Radiation Sphere Setup (远场辐射切面设置)”对话框

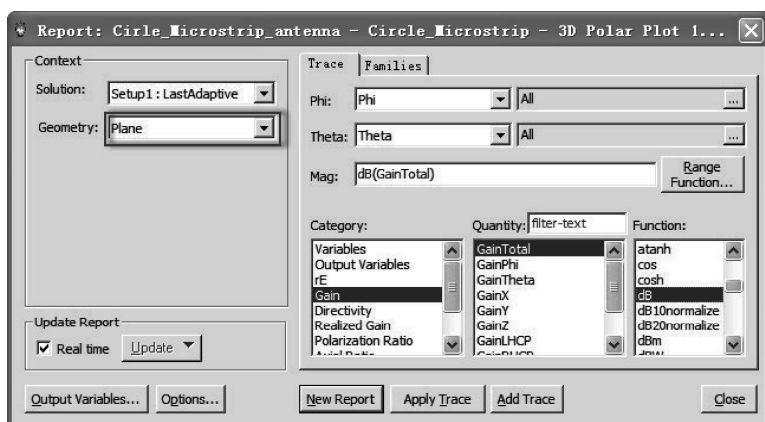


图 9-89 “Report”对话框

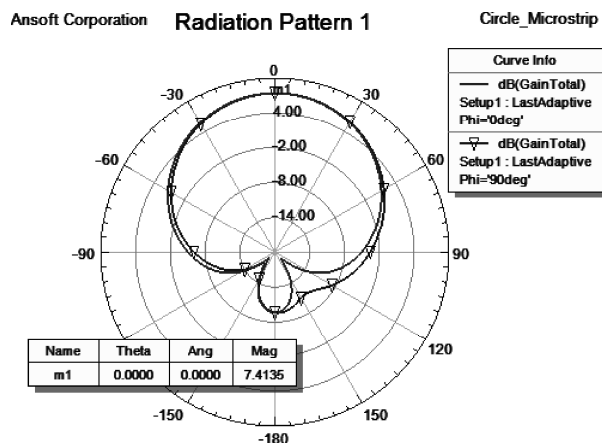


图 9-90 XoZ 和 YoZ 切面的二维远场辐射增益方向图

# 第10章 频率选择表面 (FSS) 仿真实例

## 10.1 频率选择表面概述

### 10.1.1 什么是 FSS

频率选择表面 (Frequency selective surface, FSS) 是一种二维平面周期结构, 由特定形状的导体贴片或导体上的缝隙沿着平面周期排列形成, 对照射在它上面的电磁波 (包括红外线和自然光) 具有良好的空间滤波特性, 在微波工程领域具有广泛的应用前景。近年来, 微波工程师们对 FSS 的物理特性、设计方法等方面进行了越来越深入的研究, 并且不断地扩展其新的用途。

应用 FSS 技术的天线罩, 不仅有效地降低了天线 RCS, 而且大大减少了频带外杂波对电设备的干扰。FSS 用于抛物面天线的副反射面, 可实现双频复用。这样有效地提高了抛物面的利用效率, 从而降低了天线系统的质量、体积和费用。

FSS 周期结构单元一般为贴片或缝隙。贴片单元 FSS 在低频段传输, 高频段反射, 与低通滤波器相似。缝隙单元 FSS 与之相反。贴片和缝隙单元 FSS 的传输曲线如图 10-1 所示。

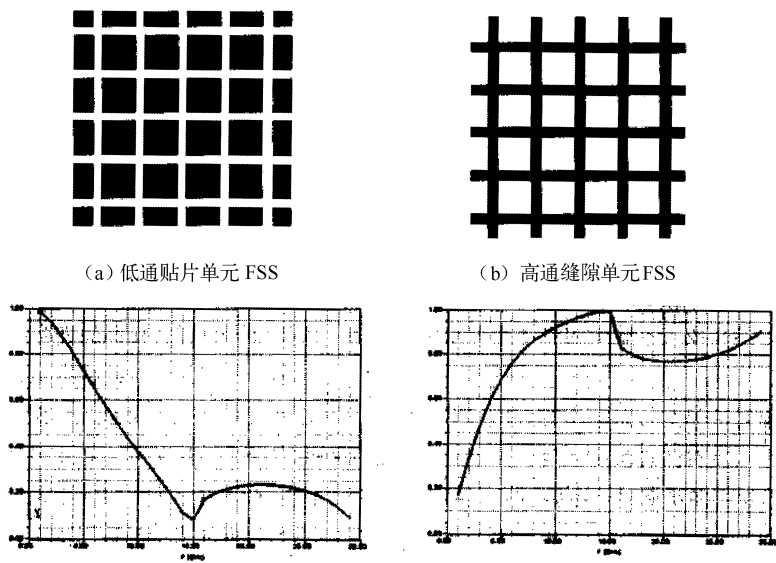


图 10-1 贴片和缝隙单元 FSS 的传输曲线

如图 10-2 所示, 常用 FSS 单元的形式有矩形对称振子、圆形对称振子、六边形对称振子、十字交叉对称振子、Y 形对称振子。



图 10-2 常用 FSS 单元

### 10.1.2 周期单元对 FSS 的影响

对于条状对称振子单元 FSS, 当平面电磁波照射, 对称振子的长度是半波长的整数倍时 FSS 发生谐振, 散射能量。因为相邻单元间的感应电流有相位延迟, 所以大量条状对称振子组阵, 所有单元重新辐射的能量将在某个方向叠加, 发生反射 (反射角等于入射角)。

对于方环和圆环形贴片单元 FSS, 当半环长度等于半波长的整数倍时发生谐振, 换句话说, 每个半环扮演对称振子的角色。这样, 整个环的长度就是谐振波长的整数倍。为了避免散射方向图中出现零点, 半环的长度必须是半个波长 (一个波长的对称振子在宽边方向有一个零点, 1.5 倍波长的对称振子在偏离宽边的方向将形成两个零点。相似的, 多波长环也会在散射方向图中形成不需要的零点)。当有介质层加载时, 电波长必须是一个有效波长。

对于贴片型 FSS, 当单元尺寸与谐振尺寸有较大差异时, 入射波会几乎完全透过 FSS, 仅仅因为介质遮挡的原因而产生少量损耗。

### 10.1.3 介质加载对 FSS 的影响

将 FSS 加载在介质板表面或夹在介质板中间, 一方面可以增强 FSS 的机械强度, 另一方面可以改善 FSS 的电磁性能, 有利于工程应用。因此, 设计时一定要考虑介质加载对 FSS 特性的影响。

介质加载一般有两种形式: (1) 金属层一侧加载; (2) 将金属层嵌入介质中, 即两侧加载。对于一侧作为衬底加载的介质, 其厚度变化对 FSS 特性的影响大致有以下三种情况: (1) 加载介质厚度的增加使谐振频率降低, 到一定程度时谐振频率趋于稳定; (2) 谐振点的传输损耗在无介质时最低, 可以为 0, 随着厚度的增加, 损耗加大; (3) 传输带宽随厚度的增加而减小。

## 10.2 环形单元 FSS 的原理分析

本节将利用 HFSS 设计一个谐振在 25GHz 附近的频率选择表面, 单元类型选择圆环形金属贴片, 由介质基板作为衬底支撑, 同时调节谐振频率。环形单元 FSS 的局部结构示意图如图 10-3 所示, 整个环形单元 FSS 为圆环周期阵, 结构对称。

采用圆环形金属贴片设计环形单元 FSS, 可以方便地调节谐振频率和带宽。对于无介质支撑的环形单元 FSS, 它谐振在周长为自由空间波长的整数倍处。当有介质支撑时, 根据介电常数和介质板的厚度, 圆环单元周长将有一定的减小, 相应的, 谐振频率也会有所降低。可以通过改变圆环半径来方便地调节环形单元 FSS 的谐振频率。圆环线宽不同, 则环形单元 FSS 表面金属部分所占的比例不同。当圆环线比较宽时, 金属面积大, 则反射带宽较



宽；当圆环线较窄时，金属面积小，相应地反射带宽就窄。这样就可以通过圆环的线宽来调节环形单元 FSS 的反射带宽了。

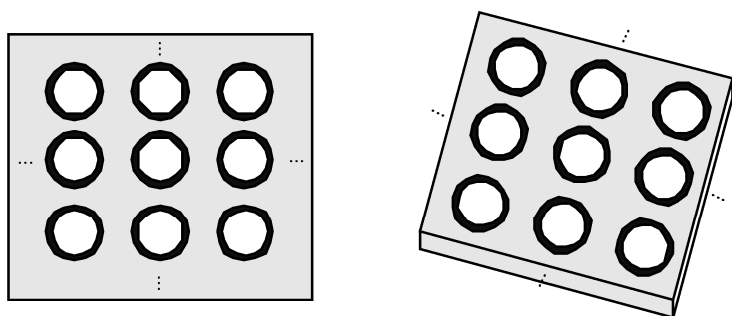


图 10-3 环形单元 FSS 的局部结构示意图

### 10.3 HFSS 仿真设计概述

FSS 是平面周期结构，由数千，甚至数万个单元组成。通常，每个单元的尺寸可以和谐振波长相比拟，FSS 的总尺寸达到数十个波长。要想在计算机上建立真实的 FSS 模型，直接进行数值计算，仅利用现有的理论水平和硬件配置很难实现。利用 HFSS 软件进行仿真，利用主、从边界条件和 Floquet 激励可以通过对一个周期单元建模分析来得到整个周期 FSS 结构的电磁特性，从而大幅度减少周期阵列的计算量。

由于要求 FSS 谐振在 25GHz 附近，所以根据 10.2 节的原理分析，首先选取 FSS 的初始尺寸结构，如图 10-4 所示。其中  $R_1=1.49\text{mm}$ ， $W=0.5$ ， $R_2=2.00\text{mm}$ ， $L=4.2\text{mm}$ ，介质衬底相对介电常数  $\epsilon_r=2.85$ ，厚度  $h=0.5\text{mm}$ 。

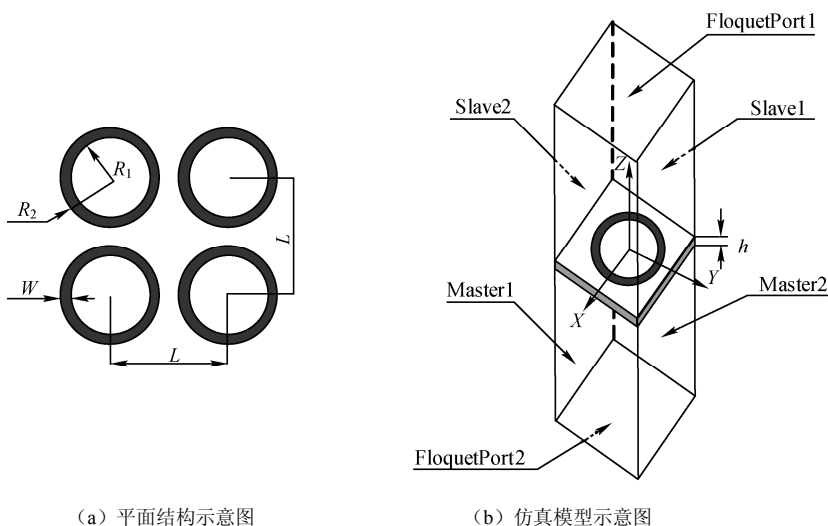


图 10-4 FSS 的初始尺寸结构

如图 10-4 (b) 所示, HFSS 仿真时, 只建模一个环形单元和介质衬底, 用高于模型 2 个波长的空气腔将周期单元包含在内, 然后在空气腔的 4 个侧面上设置两组主、从边界来模拟 FSS 的周期结构, 再在空气腔的上、下两个端面设置 Floquet 端口激励模拟场垂直入射情况, 通过查看仿真结果中两个端口的  $S$  参数来观察结构的频率选择特性。

HFSS 仿真的相关设置如下。

- (1) 求解类型: 模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位: 毫米 (mm)。
- (3) 边界条件: 主、从边界条件。
- (4) 激励类型: Floquet 端口激励。
- (5) 求解及扫频设置: 求解频率为 25GHz, 扫频范围为 10~40GHz。
- (6) 查看仿真结果:  $S$  参数扫频曲线。

下面介绍详细的仿真设计过程。

## 10.4 创建工程设计

### 10.4.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令, 或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件, 如图 10-5 所示。



图 10-5 启动 HFSS 软件

当软件启动后, 会自动创建一个新工程, 其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计, 名称为 HFSSDesign1, 并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中“HFSSDesign1”, 单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令, 将设计名称改为 FSS。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令, 将工程保存在指定的文件夹内, 并命名为 Ring\_FSS.HFSS, 步骤如图 10-6 所示。

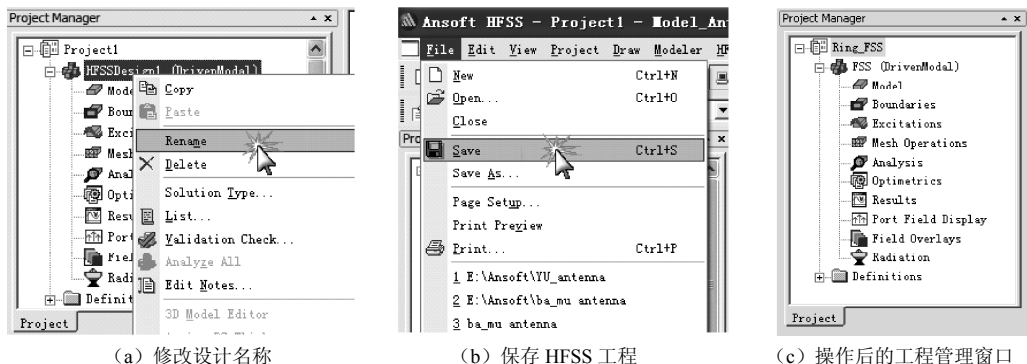


图 10-6 创建并保存新工程

## 10.4.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 10-7 所示。

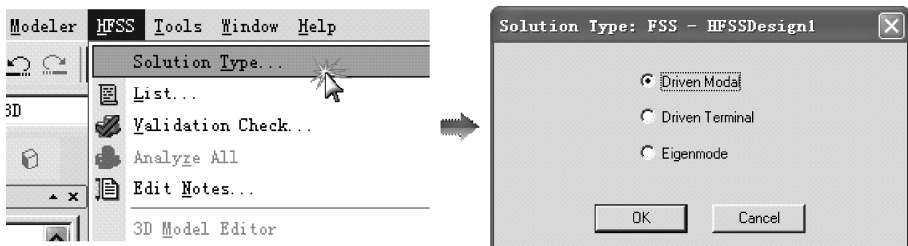


图 10-7 设置求解类型

## 10.4.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”项，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 10-8 所示。

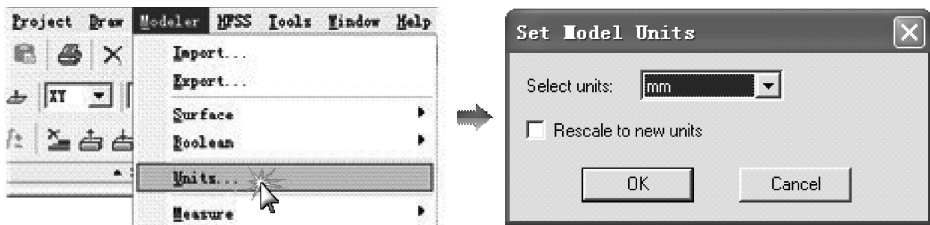


图 10-8 设置模型尺寸单位



### 10.4.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit Properties of new primitives”复选框，步骤如图 10-9 所示。

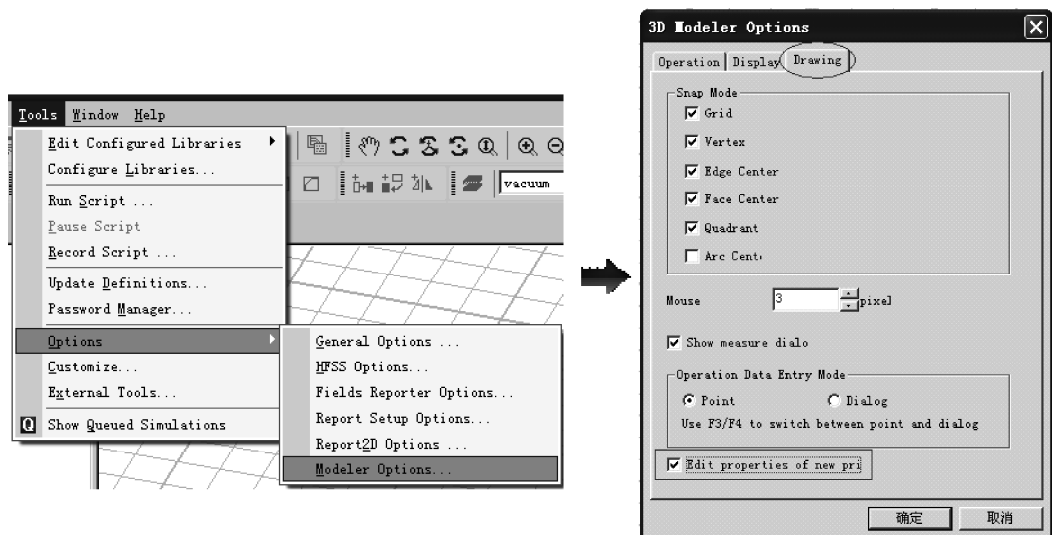


图 10-9 设置“3D Modeler Options”对话框

勾选此项的目的是为了在进行建模操作过程中，创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出模型的“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口中对模型的属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令，分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

## 10.5 创建 FSS 仿真模型

### 10.5.1 定义设计变量

根据图 10-4 可知，定义的相关设计变量有内环半径  $R_1=1.49\text{mm}$ ，圆环宽度  $W=0.5\text{mm}$ ，外环半径  $R_2=R_1+W$ ；圆环间距  $L=4.2\text{mm}$ ；介质板厚度  $h=0.5\text{mm}$ 。

首先定义设计变量  $R_1=1.49\text{mm}$ 。

在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的“设计变量”对话框中单击左下角的“Add...”按钮来添加新的设计变量，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称 R1，在“Value”栏中给变量赋值 1.49mm，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 R1。变量定义步骤如图 10-10 所示。

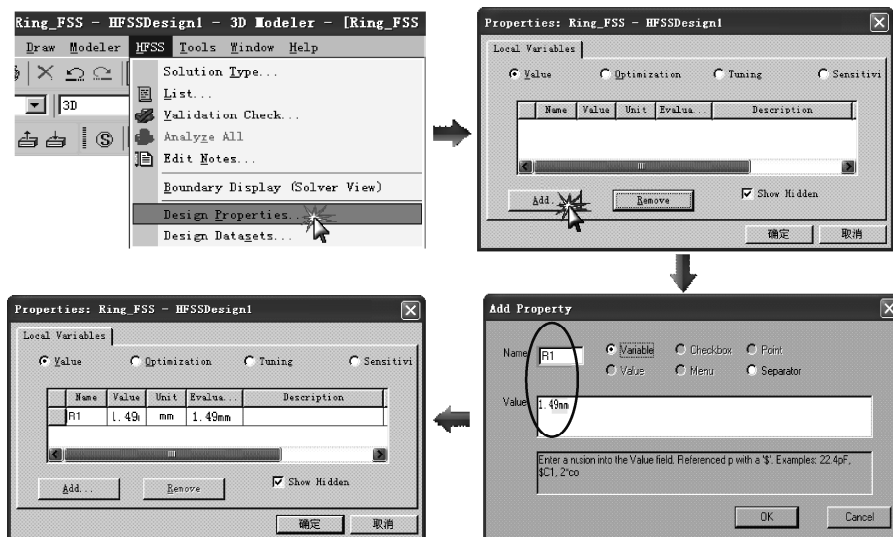


图 10-10 定义设计变量 R1

再次单击左下角的“Add...”按钮，在弹出的“添加属性”对话框中的“Name”栏输入变量名称 W，在“Value”栏中给变量赋值 0.5mm，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 W。

重复以上步骤添加其他设计变量，添加完成后的设计变量列表如图 10-11 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。

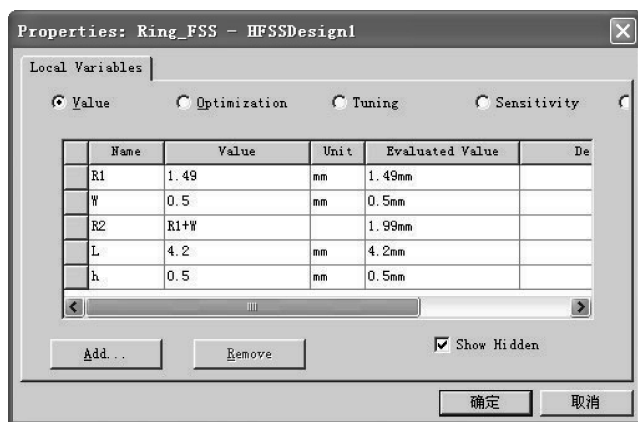



图 10-11 操作完成后的设计变量列表

## 10.5.2 创建环形单元模型

### 第一步：创建圆形平面模型 ring

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Circle”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入创建圆形平面模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态, 第一步移动鼠标至坐标轴原点并单击鼠标左键确定圆形平面中心位置, 第二步移动鼠标在  $xy$  平面绘制出一个圆形后, 在任意点单击鼠标左键确定圆形平面半径。这样任意一个圆形平面模型就创建完成了。操作完成后, 在生成圆形平面模型的同时, 会自动弹出圆形平面模型的“属性”对话框, 如果没有弹出“属性”对话框, 用户可以按照 10.4.4 节介绍的方法进行相关设置。接下来编辑、修改“属性”对话框中的各项, 具体操作为: 在“Command”选项卡中编辑圆形平面位置的尺寸属性, 将中心点“Center Position”项修改为 0, 0, 0, 对称轴“Axis”项选为 Z, 半径“Radius”项输入变量 R2; 单击切换至“Attribute”选项卡, 将“Name”栏中的 Circle1 改为 ring, 其他选项保持默认设置不变, 如图 10-12 所示。

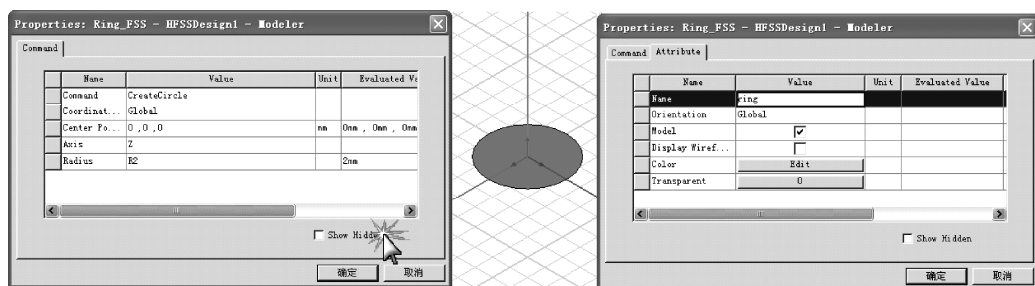


图 10-12 修改后的“Command”和“Attribute”选项卡

编辑完成后单击“确定”按钮结束, 在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的圆形平面模型 ring, 然后按下 Ctrl+D 键, 以适当尺寸显示模型, 如图 10-13 所示。

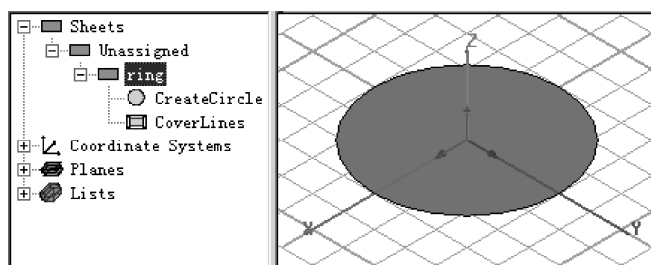



图 10-13 圆形平面模型 ring

## 第二步: 创建圆形平面模型 ring\_in

重复第一步的操作, 绘制一个任意大小的圆形平面, 修改模型属性, 具体操作为: 在模型“属性”对话框的“Command”选项卡中编辑圆形平面模型位置的尺寸属性, 将中心点“Center Position”项修改为 0, 0, 0, 对称轴“Axis”项选为 Z, 半径“Radius”项输入变量 R1; 单击切换至“Attribute”选项卡, 将“Name”栏中的 Circle1 改为 ring\_in, 然后按下 Ctrl+D 键, 以适当尺寸显示模型, 如图 10-14 所示。

## 第三步: 相减操作生成环形单元模型

按住键盘 Ctrl 键的同时, 用鼠标在模型操作历史树中选中模型名称 ring 和 ring\_in, 然后执行“Modeler→Boolean→Subtract...”命令, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 弹出



“Subtract”对话框，利用中间的“”和“”按钮确保 ring 位于“Blank Parts”栏，ring\_in 位于“Tool Parts”栏，然后单击“OK”按钮执行相减操作，操作完成后生成的环形单元模型如图 10-15 所示。

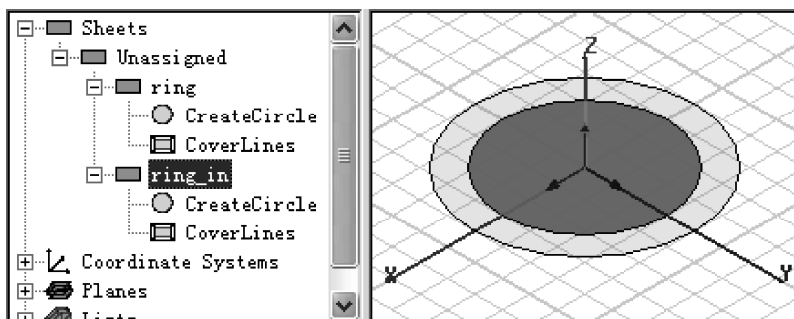


图 10-14 圆形平面模型 ring\_in

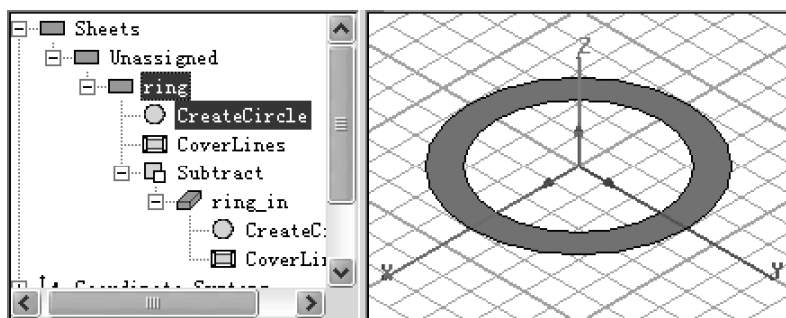


图 10-15 相减操作生成的环形单元模型

至此便完成了环形单元模型的创建，再次按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

### 10.5.3 创建介质衬底

首先选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。如图 10-16 所示，在模型显示窗口中三次单击鼠标左键，选择三个坐标点创建一个任意大小的长方体模型。

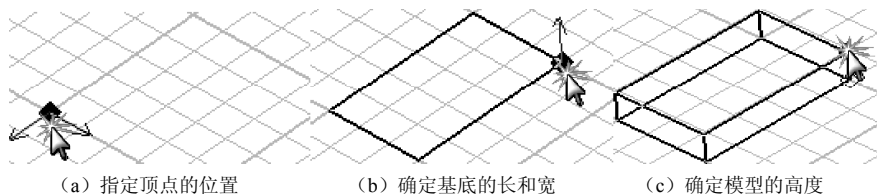


图 10-16 创建任意大小的长方体模型

在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：

“Command”选项卡的中心点位置设为 $-L/2$ ， $-L/2$ ，0mm，“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 L、L 和-h；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 Substrate，单击“Material”项“Value”列中的“vacuum”按钮，弹出“Select Definition”对话框，如图 10-17 所示。

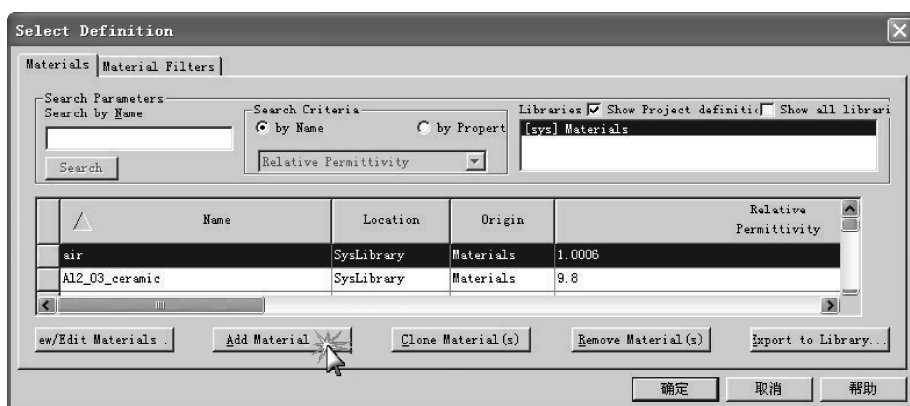


图 10-17 “Select Definition”对话框

单击“Select Definition”对话框下面的“Add Material...”按钮，弹出“View/Edit Material (查看/编辑材料)”对话框，在其中的“Relative Permittivity”项对应的“Value”列中输入新材料的相对介电常数 2.85，如图 10-18 所示。

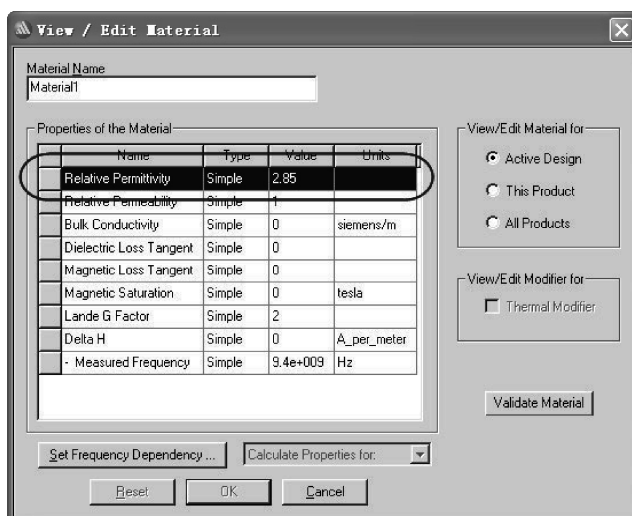


图 10-18 编辑新材料的属性

单击“OK”按钮返回“Select Definition”对话框，再单击“确定”按钮完成设置，便为长方体衬底模型指定了新的材料属性，新材料的名称为 Material1。单击“Transparent”项“Value”列中的按钮，调整滑块位置，将模型透明度设置为 0.6。最后得到的长方体模型的“属性”对话框如图 10-19 所示。

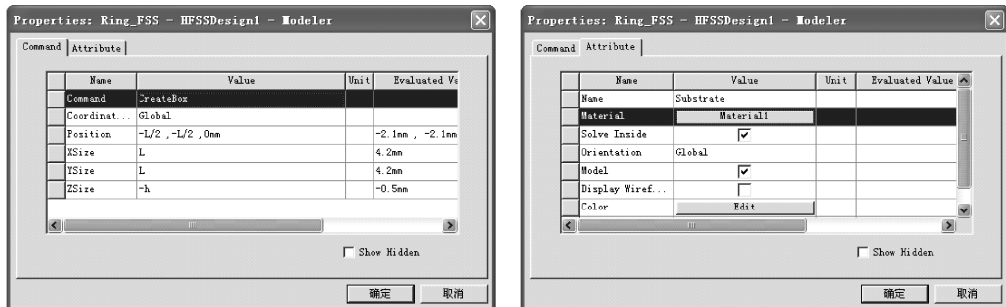


图 10-19 长方体模型的“属性”对话框

创建完介质衬底的仿真模型如图 10-20 所示。

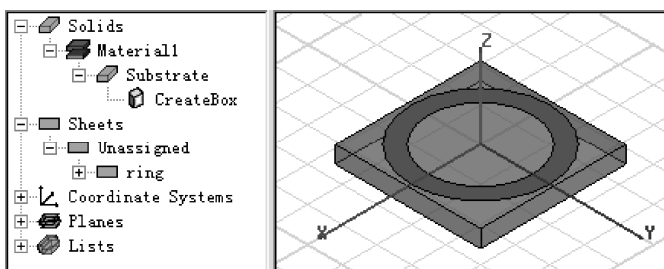



图 10-20 创建完介质衬底的仿真模型

## 10.5.4 创建空气腔

选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。按照图 10-16 所示步骤，在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为  $-L/2$ ， $-L/2$ ， $-10\text{mm}$ ，“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 L、L 和 20；单击切换至“Attribute”选项卡，将“Name”栏中的 Box1 改为 air，再单击“Transparent”项“Value”列中的按钮，调整滑块位置，将模型透明度设置为 0.8；其他选项保持默认设置不变，如图 10-21 所示。

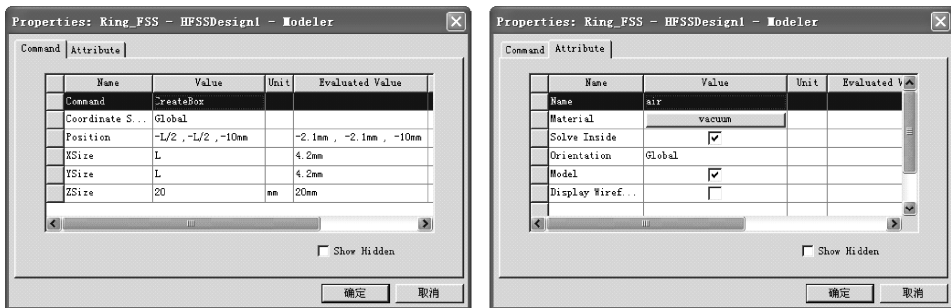


图 10-21 编辑好的空气腔“属性”对话框

单击“确定”按钮完成空气腔的创建，然后按住键盘的 Alt 键不放，移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角。接下来再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的 FSS 模型如图 10-22 所示。

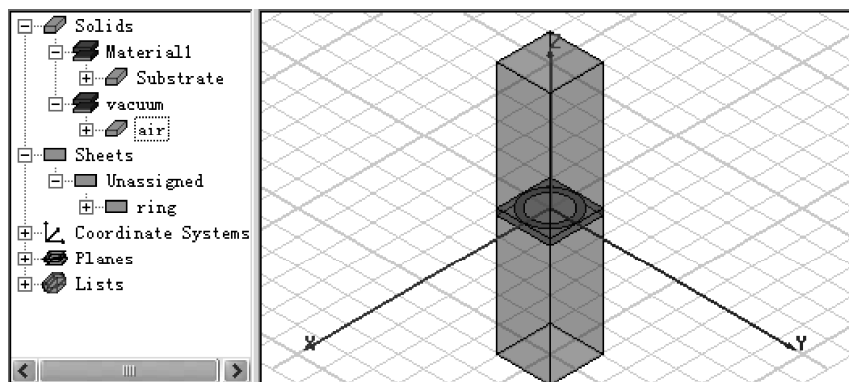



图 10-22 创建了空气腔的 FSS 模型

## 10.6 设置激励及边界条件

### 10.6.1 设置 Floquet 端口激励

#### 1. 在空气腔上端面创建 Floquet 端口激励

首先单击工具栏  中的倒三角形，在打开的下拉菜单中选择“Face”，将模型选择模式切换至面选择状态。如图 10-23 (a) 所示，用鼠标选取空气腔的上表面，在选中上表面的前提下，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitations → Floquet Port”命令，在弹出的“Floquet Port”设置对话框的“General”标签页中，默认端口名称“Name”设为 FloquetPort1；在“Lattice Coordinate System”项中，单击 A 项后的下拉菜单，选择“New Vector...”命令，进入绘制新向量状态，回到模型显示窗口，在上端面右侧棱边沿 X 正方向绘制一个新向量，绘制完成后会自动标记为向量 a；同理，单击 B 项后部的下拉菜单选择“New Vector...”命令，在上端面后部棱边沿 Y 轴负方向绘制新向量，绘制完成后旁边会自动标记为向量 b。绘制完成后的效果如图 10-23 (b) 所示。

绘制完向量线后，单击“General”标签页中的“下一步”按钮进入“Phase Delays”标签页，默认扫描角度“Phi”和“Theta”的值为 0，以模拟场垂直入射时的情况；单击“下一步”按钮进入“Modes Setup”标签页，在“Number of”项输入 2，即选择两种模式进行分析，分别为 TE 和 TM 模式；单击“下一步”按钮进入“3D Refinement”标签页，分别勾选“TE”和“TM”项的“Affects Refinement”列中的勾选框；单击“下一步”按钮进入“Post Processing”标签页，选取默认设置，单击“完成”按钮结束 Floquet 端口激励的设置。设置完成后，名为 FloquetPort1 的端口激励会自动添加到工程管理树的“Excitations”节点下，用户可以单击查看和编辑对应的激励属性，如图 10-24 所示。

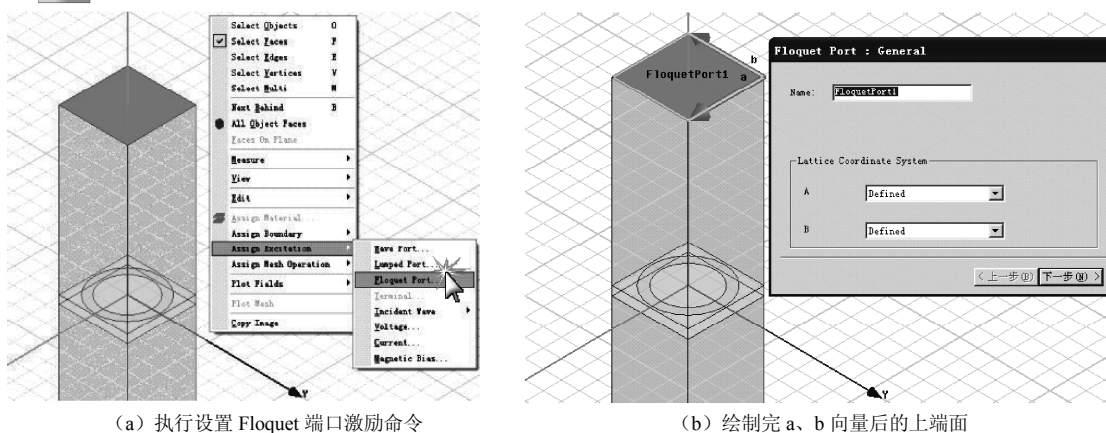


图 10-23 设置 Floquet 端口激励

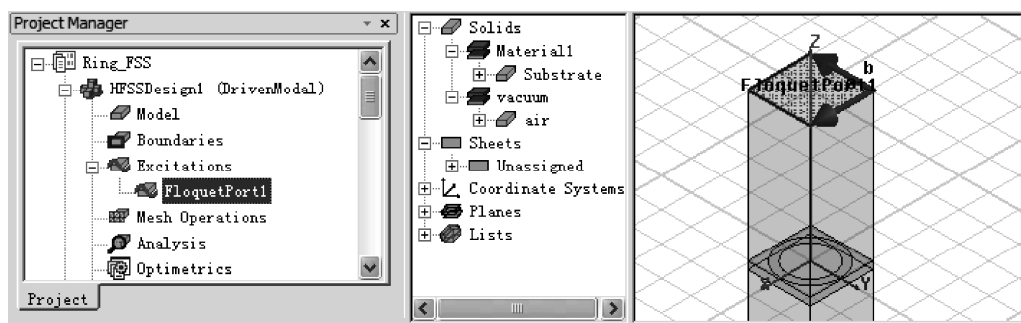


图 10-24 上端面的 Floquet 端口激励

## 2. 在空气腔下端面创建 Floquet 端口激励

选取空气腔下端平面，然后按照创建上端面 Floquet 端口激励的步骤进行操作，确保绘制的 a、b 向量与上端口的 a、b 向量方向一致，生成的端口激励如图 10-25 所示。

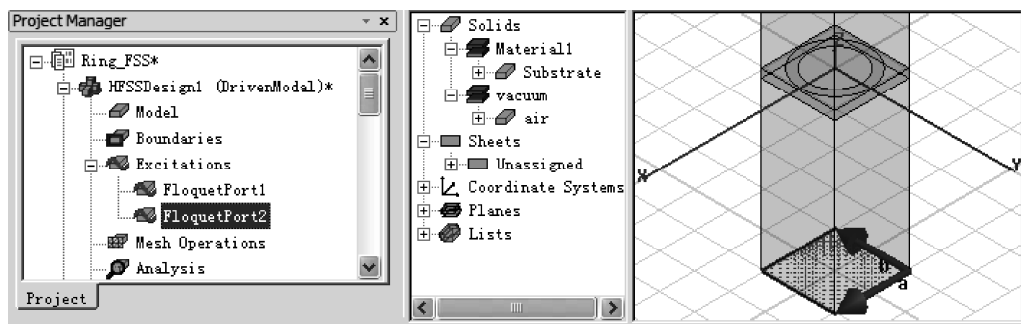


图 10-25 下端面的 Floquet 端口激励

至此便完成了模型激励的设置，再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。





## 10.6.2 设置主、从边界条件

为了通过一个周期单元来模拟无限大周期 FSS 结构, 需要为周期单元添加主、从边界条件, 这种边界条件强制使从边界上每一点的电场与主边界上相应点的电场存在一个相位差。主、从边界条件实质上就是通过一对主边界和从边界共同实现在该方向上的周期特性, 以模拟无限周期结构。

### 1. 设置第一对主、从边界条件

首先在平面选择模式下, 选中空气腔位于 X 轴前端的 XoZ 平面, 单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 “Assign Boundary→Master...” 命令, 如图 10-26 (a) 所示, 弹出 “Master Boundary” 对话框, 默认主边界名为 Master1, 再单击 “U Vector” 项后端的倒三角, 在对应的下拉菜单中选择 “New Vector” 命令, 进入绘制向量状态, 在选中的 YoZ 平面的下棱边沿 Y 轴正方向绘制向量线, 注意绘制向量线时两端点要与平面的棱边顶点重合, 绘制完成后, 勾选 “V Vector” 后的复选框, 如图 10-26 (b) 所示。

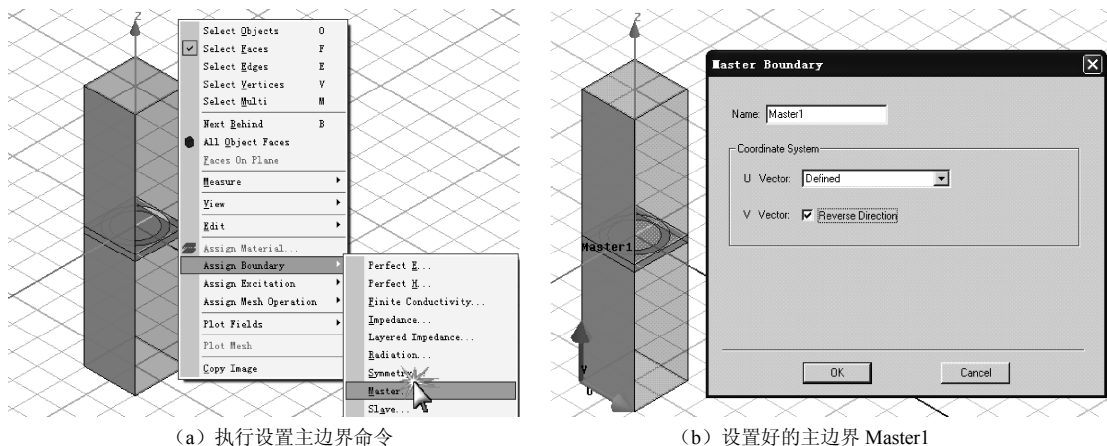


图 10-26 设置 Master1 主边界

单击 “OK” 按钮完成主边界的设置。

接下来选中空气腔与刚才平面对应的位于模型后侧的另一个 YoZ 平面。如果不能够直接选取, 可以按住键盘 Alt 键的同时, 按下鼠标左键并拖动来旋转模型至方便选取的视角进行选取操作。选中后, 在显示窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 “Assign Boundary→Slave...” 命令, 如图 10-27 (a) 所示, 弹出从边界设置对话框, 在 “General Data” 标签页中默认从边界名为 Slave1, 在 “Master” 项中选择主边界 Master1, 单击 “U” 项后的下拉菜单, 选择 “New Vector” 命令, 进入绘制向量线状态, 再在选中的 YoZ 平面的下棱边沿 Y 轴正向绘制向量线, 绘制完成后不勾选 “V” 项后面的复选框, 完成的从边界如图 10-27 (b) 所示。

单击 “下一步” 按钮进入 “Phase Delay” 标签页, 保持默认设置不变, 单击 “完成” 按钮确认操作。



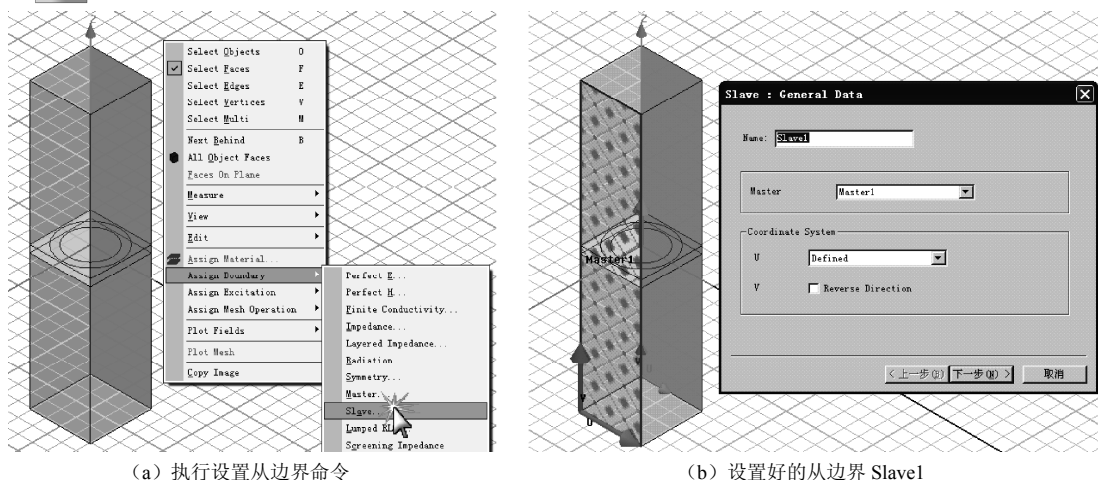


图 10-27 设置 Slave1 从边界

至此便完成了第一对主、从边界的设置工作，这样在工程管理树的“Boundary”节点下会自动添加名为 Master1 和 Slave1 的一对主、从边界，单击查看，如图 10-28 所示。

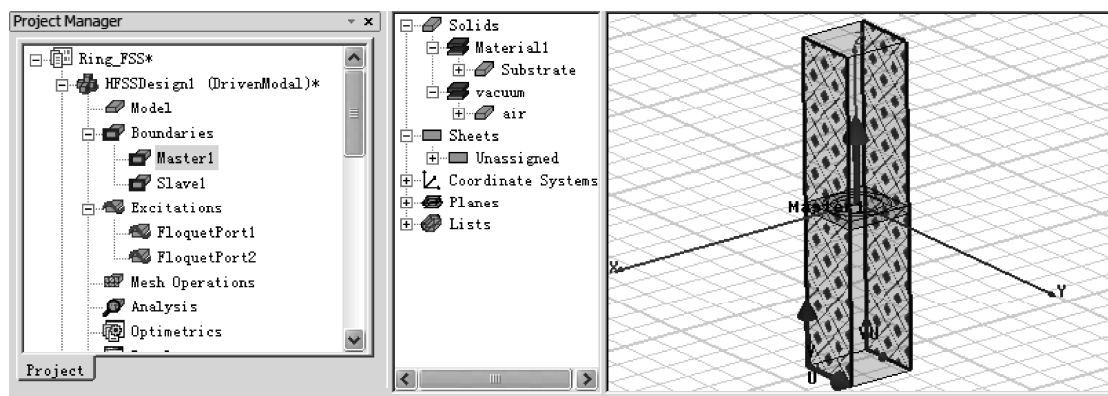


图 10-28 第一对主、从边界条件 Master1 与 Slave1

## 2. 设置第二对主、从边界条件

首先设置第二个主边界条件 Master2：选中空气腔后侧的 XoZ 平面，用鼠标右键选择“Assign Boundary→Master...”命令，默认主边界条件名为 Master2，在“U vector”项的下拉菜单中选择“New Vector”命令，进入绘制向量线状态，在选中的 XoZ 平面的下棱边沿 X 轴正方向绘制向量线，操作完成后勾选“V Vector”项后的复选框，如图 10-29 所示。

接下来设置从边界条件 Slave2：选中空气腔位于 Y 轴前端的 XoZ 平面，执行右键菜单中的“Assign Boundary→Slave...”命令，在“General Data”标签页默认从边界名为 Slave2，在“master”项选择 Master2，单击“U”项下拉菜单中的“New Vector”命令，在选中的 XoZ 平面的下棱边沿 X 轴正方向绘制向量线，绘制完后不勾选“V”项后的复选框，如图 10-30 所示。

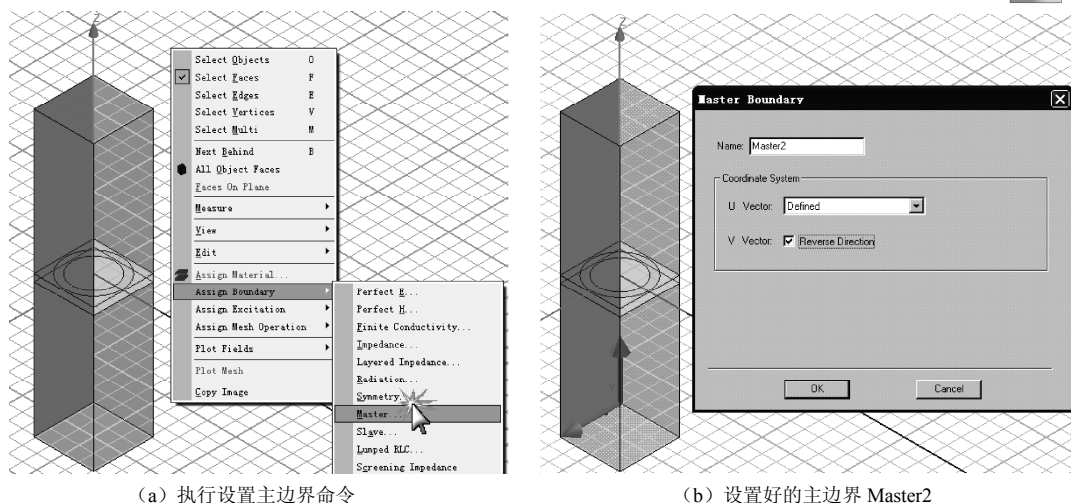


图 10-29 设置 Master2 主边界

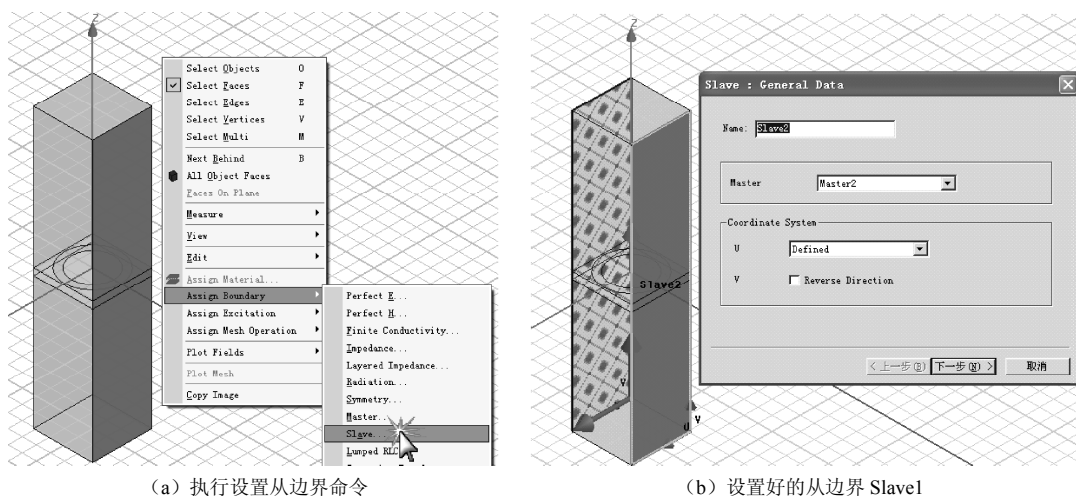


图 10-30 设置 Slave2 从边界

设置完成后单击“下一步”按钮，进入“Phase Delay”标签页，保持默认设置不变，单击“完成”按钮确认操作。

创建的第二对主、从边界条件会自动添加到工程管理树的“Boundary”节点下，单击查看，如图 10-31 所示。

### 10.6.3 设置理想导体边界条件

选中环形单元模型，打开鼠标右键菜单，执行“Assign Boundary→Perfect E...”命令，弹出“Perfect E Boundary”对话框，保持默认设置，单击“OK”按钮完成操作，将圆环指定为理想导体。这样 Perfect E1 边界会自动添加到工程管理树的“Boundary”节点下，单击

查看，如图 10-32 所示。

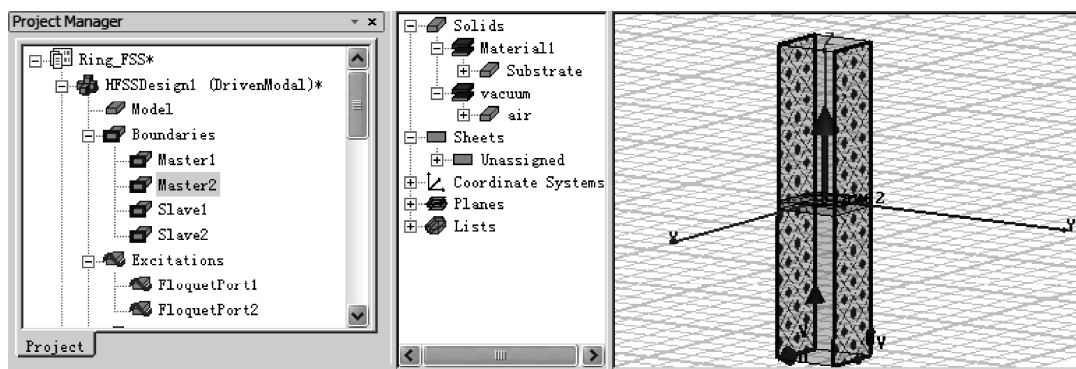


图 10-31 第二对主、从边界条件 Master2 与 Slave2

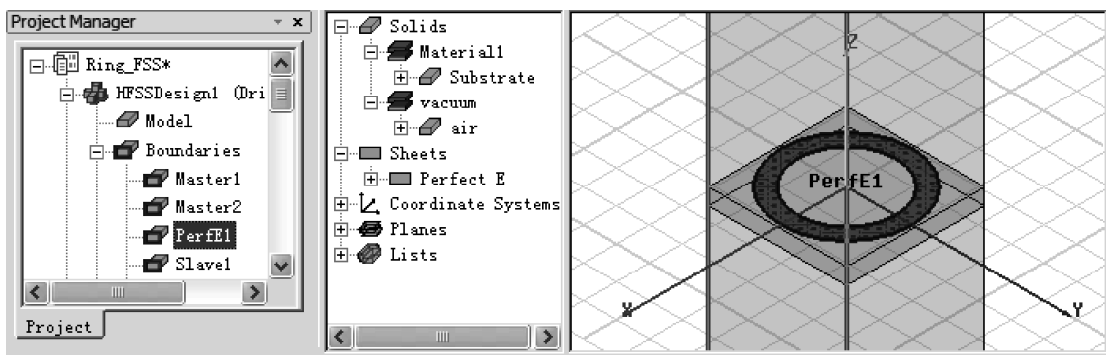



图 10-32 将圆环设置为理想导体

至此，环形 FSS 的仿真模型部分就全部完成了，按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。

## 10.7 仿真的基本设置

### 10.7.1 求解设置

本章设计的环形 FSS 的工作中心频率为 25GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 25GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 10-33 所示的“Solution Setup (求解设置)”对话框。

(2) 在“Solution Setup (求解设置)”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 25GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

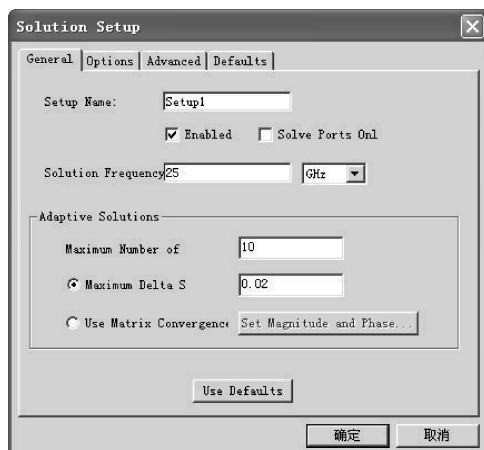



图 10-33 “Solution Setup (求解设置)”对话框

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并被自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下。

### 10.7.2 扫频设置

添加一个 10~40GHz 的扫频设置，用以分析 FSS 在此频段内的传输特性。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 10-34 所示的“Edit Sweep”对话框。

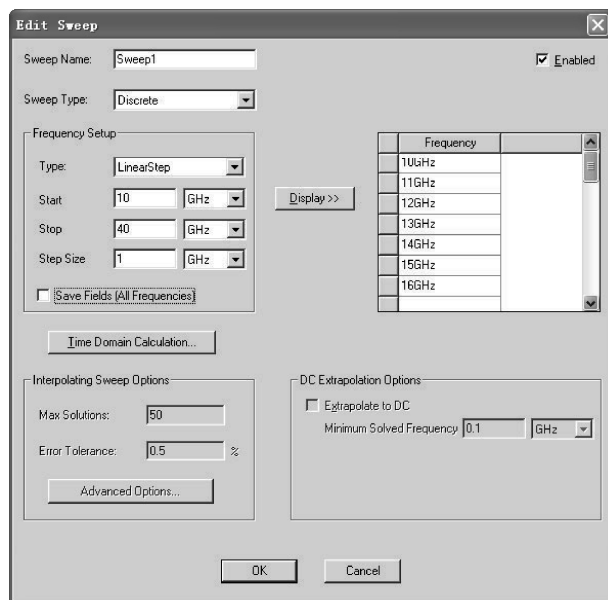


图 10-34 “Edit Sweep”对话框






(2) 在“Edit Sweep”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择 Discrete；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 10GHz，终止频率为 40GHz，步进长度为 1GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，在右侧的频率列表中便会显示扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下。

### 10.7.3 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作。接下来就可以进行分析求解了，但一般在正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口，如图 10-35 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的；如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

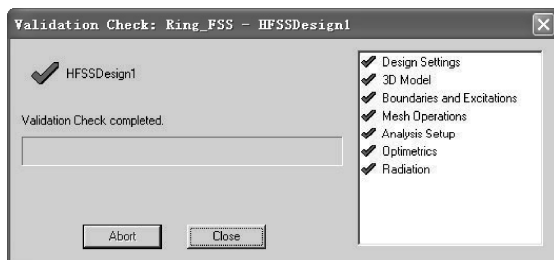



图 10-35 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置项“Setup1”上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 10-36 所示。

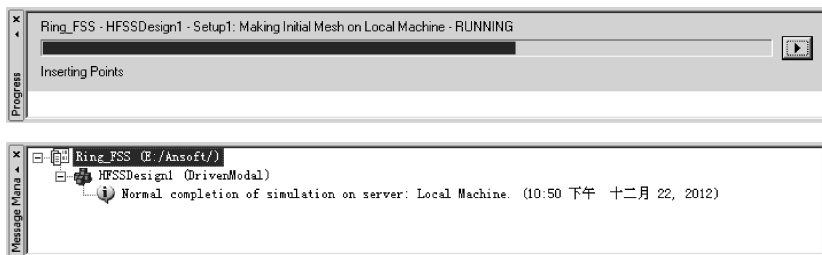


图 10-36 进程窗口和信息管理窗口

## 10.8 查看仿真分析结果

### 10.8.1 查看计算收敛情况

仿真分析计算完成后, 在查看具体电磁特性报告之前, 最好先看一下计算的收敛情况, 避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键, 在打开的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令, 如图 10-37 所示, 打开如图 10-38 左图所示的“Solutions”对话框, 然后点选切换至“Convergence”选项卡, 并在显示方式“View”项处分别点选数据列表方式 (Table) 和图形显示方式 (Plot)。

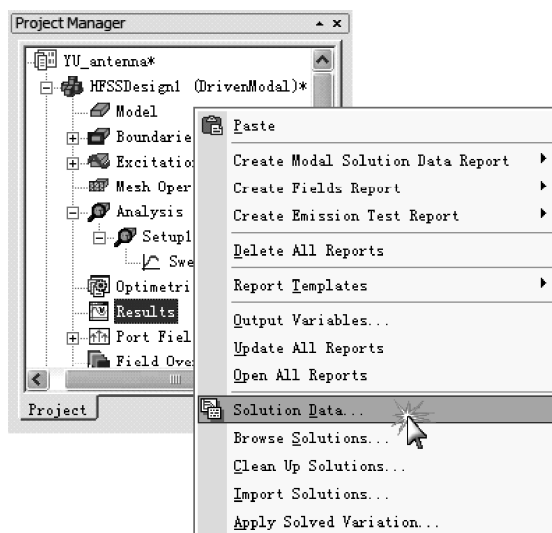


图 10-37 选择查看求解数据命令

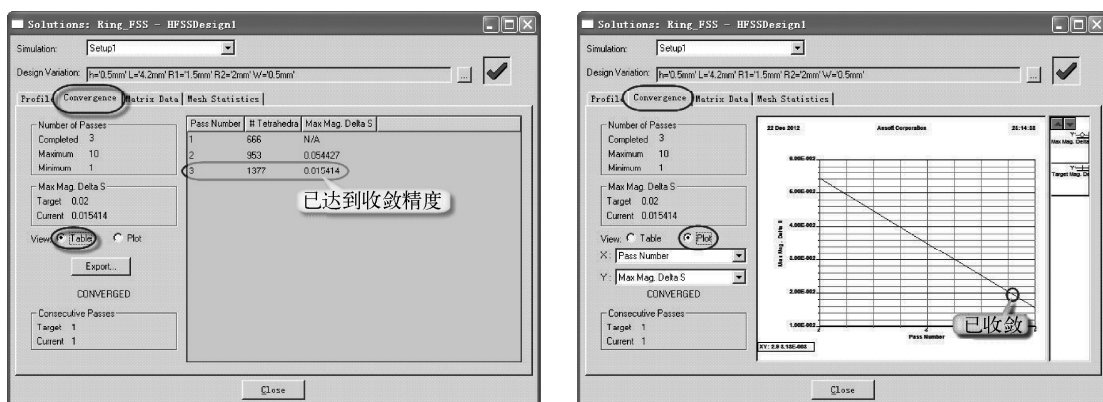


图 10-38 迭代收敛情况图表报告

由图 10-38 右图可知, 求解计算在迭代到第 3 次时达到了收敛要求, 因此其后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后, 求解还没有收敛, 则需要进一步增加迭代次数,



继续进行计算，直到收敛为止。

## 10.8.2 查看 FSS 频率选择特性

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开如图 10-39 所示的“Report”对话框。

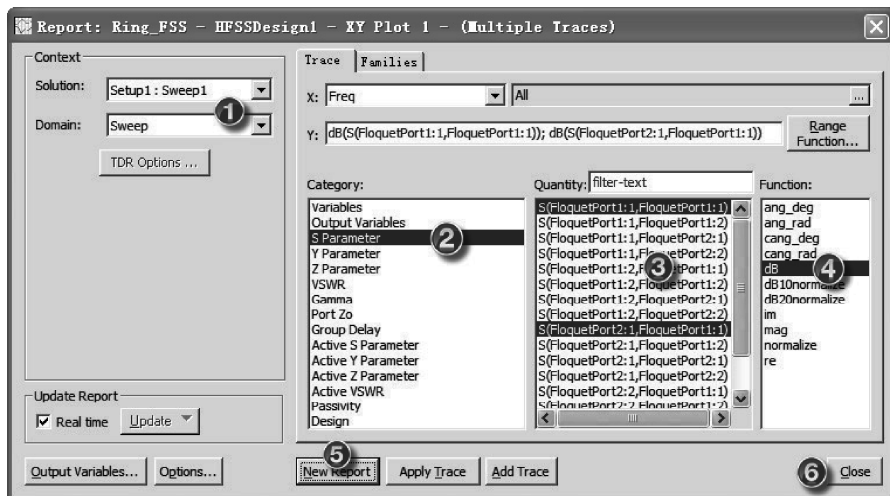


图 10-39 “Report”对话框

在“Report”对话框的“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter，在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择 S（FloquetPort1:1，FloquetPort1:1）和 S（FloquetPort2:1，FloquetPort1:1），在“Function”栏中选择 dB，然后单击“New Report”按钮生成 S11 扫频报告图形，最后单击“Close”按钮关闭对话框，生成的图形如图 10-40 所示。

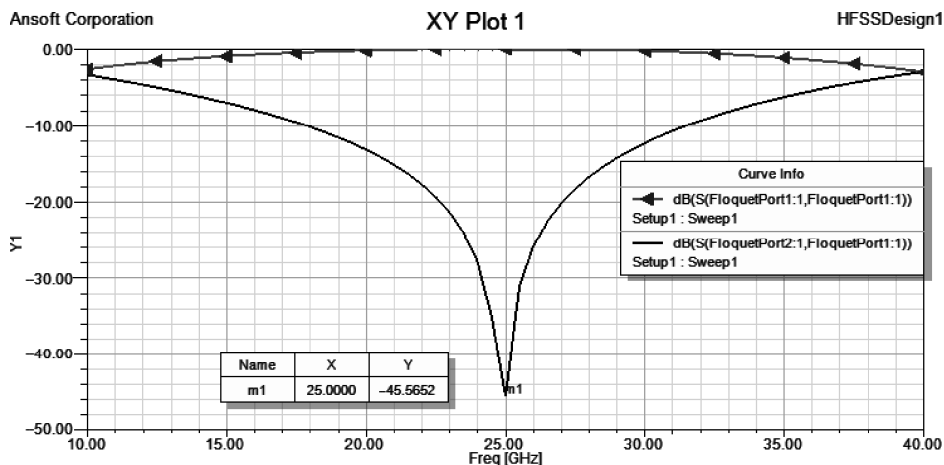



图 10-40 天线 S11 的参数扫频曲线





在图形结果窗口中单击鼠标右键，选择“Marker→Add mark”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，标注出 S11 曲线的最小值点，从图 10-40 中可以看出，当频率为 25GHz 时，S11 最小，其最小值为 -45.5dB。

通过图 10-40 还可以看出，该金属圆环 FSS 在 25GHz 附近出现谐振点，表明该 FSS 单元在此频率附近具有滤波特性。具体来说，它可以作为一个带阻滤波器来使用，它对于 25GHz 频率的波起到阻碍作用，而低于和高于此频率的波则可以顺利通过，从而起到了频率选择的作用，这也是其被称为频率选择表面的一个重要的原因。

# 第11章 阶梯型方波导圆极化器仿真实例

## 11.1 波导圆极化器概述

圆极化器是将线极化波转换为圆极化波的一种微波元器件。要想获得圆极化波，两电场分量必须幅度相等，空间垂直且相位差为  $\pi/2$ 。要想产生等幅正交的电场分量，微波元器件通常选用沿纵向对称的结构。对于波导圆极化器，一般选择圆波导或方波导，并在其中加载介质片（金属销钉）或金属阶梯膜片，以产生两个正交的极化分量，然后通过介质片或阶梯的移相效应，使两个正交分量产生  $90^\circ$  的相位差，从而在合成端形成圆极化波。典型的圆波导介质圆极化器的结构示意图如图 11-1 所示。

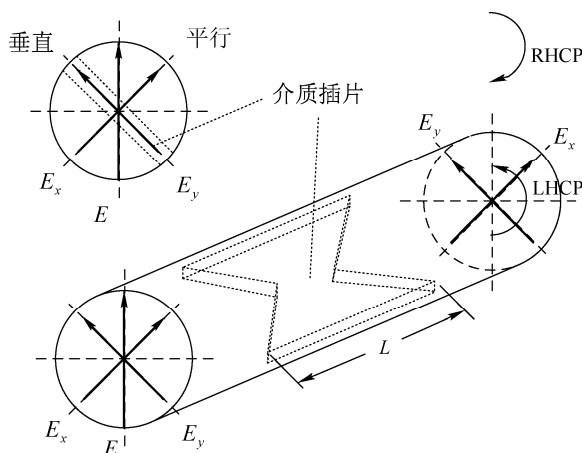


图 11-1 圆波导介质圆极化器的结构示意图

波导圆极化器的种类比较多，如十字形波导圆极化器，它是通过波导移相网络来实现圆极化的；还有波导宽壁的交叉槽圆极化器，通过在矩形波导的适当位置开两个互相垂直的交叉槽，只要交叉槽满足适当的条件，就能产生圆极化波。应用比较多的波导圆极化器一般采用圆波导或方波导加载移相元的方法来实现。这种圆极化器的轴比和插入损耗可以做得比较小，质量和体积也很小，因此无论在航空航天，还是在地面站中都得到了广泛的应用。

移相元加载的圆波导或方波导圆极化器又有多类结构：一类是移相元为金属膜片的圆极化器，金属膜片包括可调金属销钉和阶梯膜片，销钉加载的圆极化器通过调整销钉的深度控制移相量的大小来实现圆极化，阶梯膜片通过调整阶梯的长度和高度来使得入射信号在经过整个隔板后，产生所需的圆极化电磁波；另一类的移相元是介质插片，该类圆极化器是利用介质插片，使通过其中的等幅同相的两正交线极化波产生相位差来实现圆极化的。

本章将重点介绍阶梯型金属膜片加载的方波导圆极化器的原理和仿真实现。



## 11.2 方波导圆极化器的原理分析

如图 11-2 所示, 方波导圆极化器可以分为矩形波导、金属阶梯膜片和方波导三部分。其输入端口为 2 个矩形波导口, 输出端口为方波导口。

该圆极化器的工作原理是在方波导中插入具有阶梯型金属膜片来实现圆极化。通过调整阶梯型金属膜片的长度和高度, 从矩形波导口输入的  $TE_{10}$  模的功率通过阶梯后一分为二, 转换成共用方波导中两个正交的  $TE_{01}$  和  $TE_{10}$  模。对于  $TE_{10}$  模, 从矩形波导到隔板区域, 其传输常数几乎不变; 而对于  $TE_{01}$  模, 隔板区可以看成鳍形或脊形波导, 它的传播常数与阶梯的高度和长度有关, 通过调整阶梯的长度和高度, 使得入射信号在经过整个阶梯后, 产生所需的圆极化电磁波, 并保证输入端口具有良好的匹配特性和输入端口间的高隔离度。可以预见: 端口 1 单独馈电将在输出端口形成右旋圆极化波, 端口 2 单独馈电将在输出端口形成左旋圆极化波; 端口 1 和端口 2 等幅反相馈电将在输出端口形成垂直极化波, 等幅同相馈电将在输出端口形成水平极化波。

阶梯型方波导圆极化器是由方波导加载一个阶梯金属板组成的, 为了方便分析, 可以把它分为四个端口, 如图 11-3 所示。

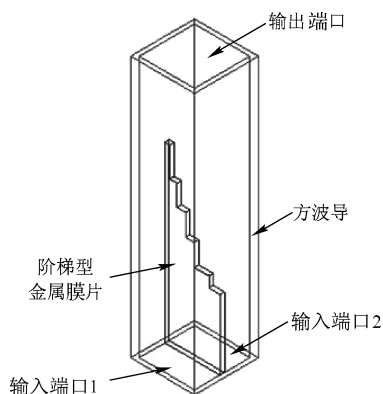


图 11-2 方波导圆极化器的结构示意图

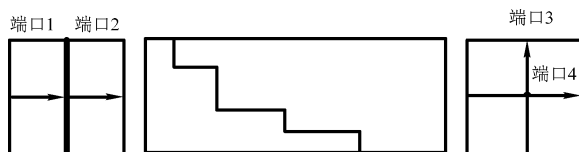


图 11-3 阶梯型方波导圆极化器的端口示意图

由于网络的互易性, 阶梯型方波导圆极化器的  $\mathbf{S}$  矩阵必定是对称的, 即  $S_{ij} = S_{ji}$ 。由膜片极化器的场型结构可以得到  $S_{23} = -S_{13}$ ,  $S_{24} = S_{14}$ , 从而得到阶梯型方波导圆极化器的  $\mathbf{S}$  矩阵如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{22} & -S_{13} & S_{14} \\ S_{13} & -S_{13} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{34} & S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (11-1)$$

假定网络是无耗的, 则其  $\mathbf{S}$  矩阵是正定的, 即  $\mathbf{S}^* \mathbf{S} = \mathbf{I}$ , 即

$$\begin{aligned} |S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 &= 1 \\ |S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 &= 1 \\ 2|S_{13}|^2 + |S_{33}|^2 + |S_{34}|^2 &= 1 \end{aligned}$$

$$2|S_{14}|^2 + |S_{34}|^2 + |S_{44}|^2 = 1 \quad (11-2)$$

显然，由式 (11-2) 可得

$$S_{11} = S_{22} \quad (11-3)$$

由于端口 4 的电场矢量与阶梯金属膜片相垂直，膜片对端口 4 入射的信号基本没有影响，它的作用仅仅是将此信号等幅同相地平分到端口 1 和端口 2，所以可以近似地得到：

$$S_{44} = 0, \quad |S_{14}| = 1/\sqrt{2} \quad (11-4)$$

将式 (11-4) 代入式 (11-2) 可得

$$S_{34} = 0 \quad (11-5)$$

$$|S_{13}|^2 = \frac{1}{2}(1 - |S_{33}|^2) \quad (11-6)$$

将式 (11-5)、式 (11-6) 代入式 (11-2) 得

$$|S_{12}|^2 = \frac{1}{2}|S_{33}|^2 - |S_{11}|^2 \quad (11-7)$$

由式 (11-7) 可以看出，阶梯型方波导圆极化器的端口隔离度  $|S_{21}|^2$  主要是由膜片平行的入射信号，即端口 3 的驻波引起的。只要通过膜片形状的优化设计，尽可能地降低端口 3 的驻波，就能提高圆极化器的两个旋向之间的隔离度。

该圆极化器的另一个关键的技术指标是圆极化轴比。要想得到理想的圆极化轴比，首先必须保证  $S_{13}$  和  $S_{14}$  的幅度尽可能相等。另外，还要满足  $S_{13}$  和  $S_{14}$  相差  $90^\circ$ 。可以通过数值方法计算出横向电场平行和垂直方波导中部分高度膜片的两电磁波传播常数的差，使得两个模式的总相位差在  $90^\circ$  附近。

### 11.3 HFSS 仿真设计概述

下面根据前面的理论分析，应用 HFSS 软件对阶梯型方波导圆极化器进行仿真设计：设计一个工作在 Ka 频段的阶梯型方波导圆极化器，其具体工作频率为 29~31GHz。

HFSS 仿真模型示意图如图 11-4 所示，方波导采用内腔尺寸建模，金属膜片直接嵌入波导中，在输入端设置两个波端口激励，以产生两个反旋圆极化；输出端为方波导口，设置一个波端口激励，但要指定两条积分线设置两个模式，分别允许方波导中的  $TE_{01}$  模和  $TE_{10}$  模通过。

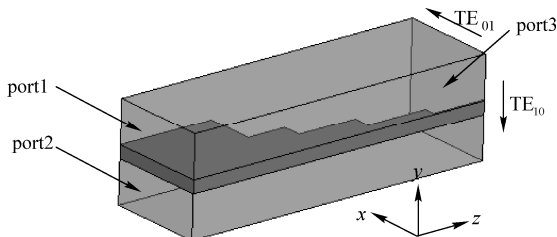


图 11-4 HFSS 仿真模型示意图



阶梯型金属膜片选择 5 级阶梯，其结构如图 11-5 所示。

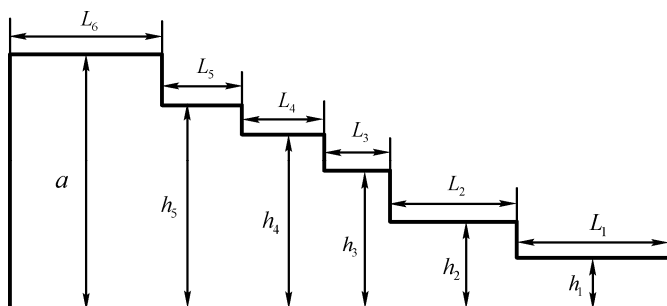


图 11-5 阶梯型金属膜片的结构

方波导口径尺寸： $a \times a = 0.64\lambda \times 0.64\lambda$ ；根据结构上的要求选择膜片的厚度  $w = 0.5\text{mm}$ 。其他参数的初始值如表 11-1 所示。

表 11-1 参数的初始值

变 量	数 值	变 量	数 值	变 量	数 值	变 量	数 值
$L_1$	$0.339\lambda$	$L_4$	$0.25\lambda$	$h_1$	$0.058\lambda$	$h_4$	$0.341\lambda$
$L_2$	$0.267\lambda$	$L_5$	$0.12\lambda$	$h_2$	$0.142\lambda$	$h_5$	$0.513\lambda$
$L_3$	$0.25\lambda$	$L_6$	$0.806\lambda$	$h_3$	$0.242\lambda$	$a$	$0.64\lambda$


HFSS 仿真的相关设置如下。

- (1) 求解类型：模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位：毫米 (mm)。
- (3) 边界条件：理想导体条件。
- (4) 激励类型：波端口激励。
- (5) 求解及扫频设置：求解频率为 30GHz，扫频范围为 29~31GHz。
- (6) 查看仿真结果： $\text{TE}_{01}$  模和  $\text{TE}_{10}$  模场分量的相位差、幅度差。

下面介绍详细的仿真设计过程。

## 11.4 创建工程设计

### 11.4.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件，如图 11-6 所示。

当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中 HFSSDesign1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 polarizer。



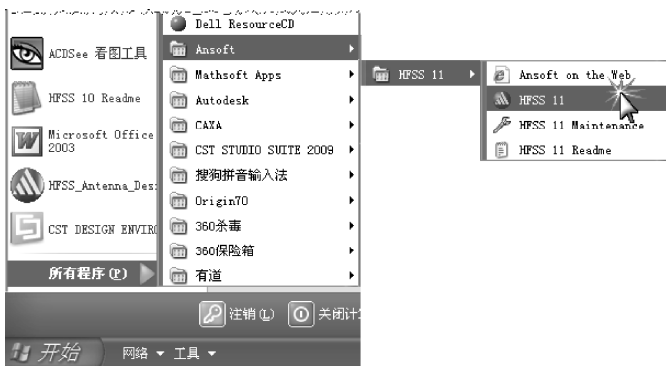


图 11-6 启动 HFSS 软件

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 Circular\_polarizer.HFSS，如图 11-7 所示。

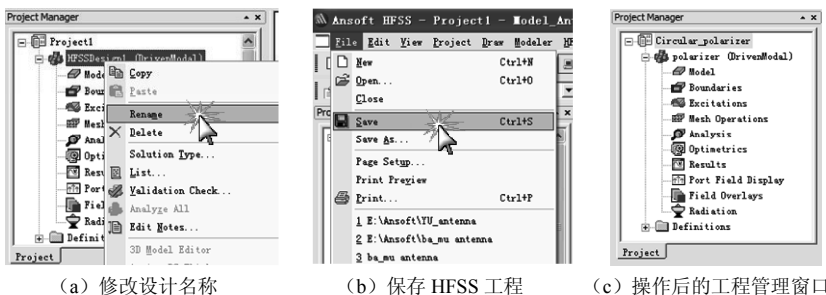


图 11-7 创建并保存新工程

## 11.4.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 11-8 所示。

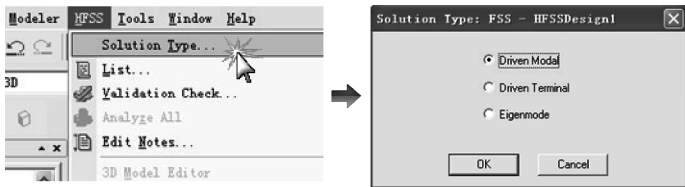


图 11-8 设置求解类型

## 11.4.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set

Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”项，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 11-9 所示。



图 11-9 设置模型尺寸单位

#### 11.4.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit properties of new primitives”复选框，如图 11-10 所示。

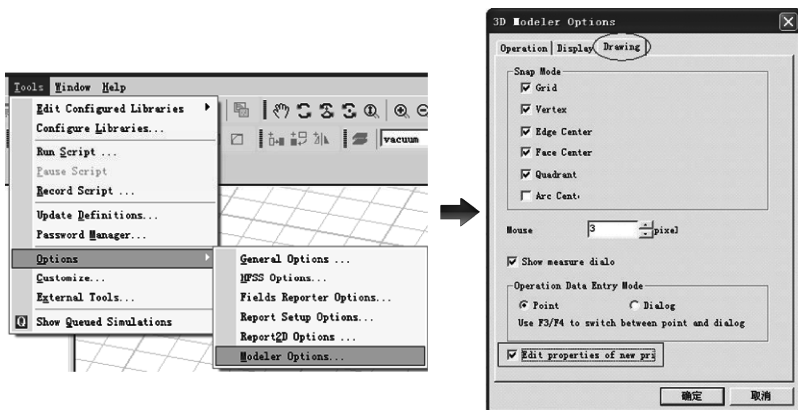


图 11-10 设置“3D Modeler Options”对话框

勾选此项是为了在建模操作过程中，创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出模型的“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型的“属性”进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令，分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

### 11.5 创建圆极化器的仿真模型

#### 11.5.1 定义设计变量

根据图 11-5，定义相关设计变量。

首先定义中心频率波长变量  $\lambda = 10\text{mm}$ 。

在主菜单栏中选择“HFSS→Design Properties...”命令，在弹出的“设计变量”对话框

中单击左下角的“Add...”按钮来添加新的设计变量，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称 lambda，在“Value”栏中给变量赋值 10mm，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 lambda。变量定义步骤如图 11-11 所示。

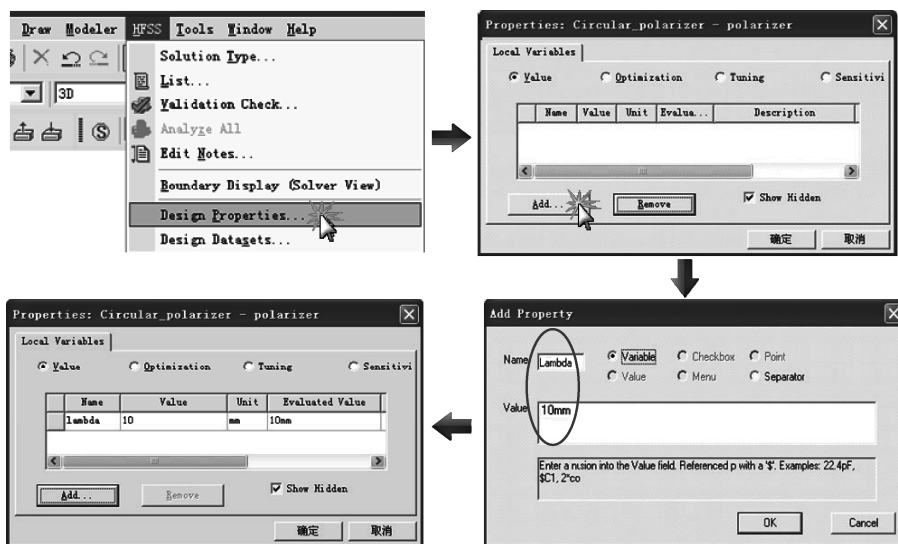


图 11-11 定义设计变量 lambda

再次单击对话框左下角的“Add...”按钮，在弹出的“Add Property (添加属性)”对话框中的“Name”栏输入变量名称 L1，在“Value”栏中给变量赋值  $0.339 \times \lambda$ ，单击“OK”按钮完成输入，自动返回上一级对话框，在变量列表中便出现了刚刚定义的变量 L1。

重复以上步骤添加其他设计变量，添加完成后的设计变量列表如图 11-12 所示，然后单击“确定”按钮完成操作。

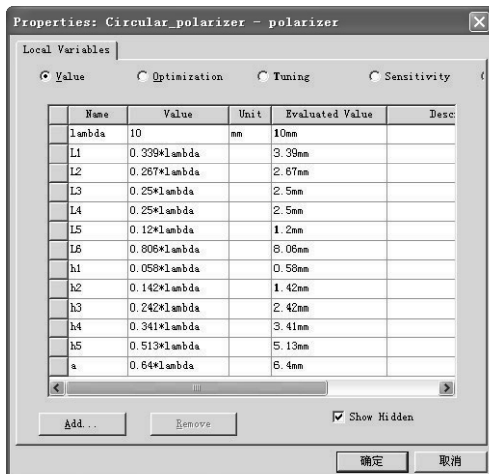


图 11-12 设计变量列表






## 11.5.2 创建阶梯型金属膜片

### 第一步：创建长方体阶梯单元

#### 1) 创建阶梯单元模型 stairs6

选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。如图 11-13 所示，首先在坐标原点单击鼠标左键，指定原点为长方体顶点，然后在 XY 平面拖动出一个任意大小的长方形，再单击鼠标左键确定长方体的底面，接下来沿 Z 轴方向移动鼠标，在任意位置单击鼠标左键确定长方体的高度，此时便创建了一个任意大小的长方体模型。

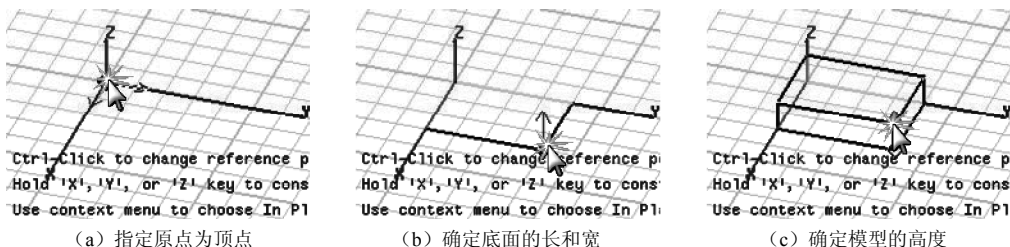


图 11-13 创建任意大小的长方体模型

在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的中心点位置设为 0mm, 0mm, -w/2, “XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 a、L6 和 w；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 stairs6，其他选项保持默认设置不变，如图 11-14 所示。

编辑完成后单击“确定”按钮结束，在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的长方体模型 stairs6，然后按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型。

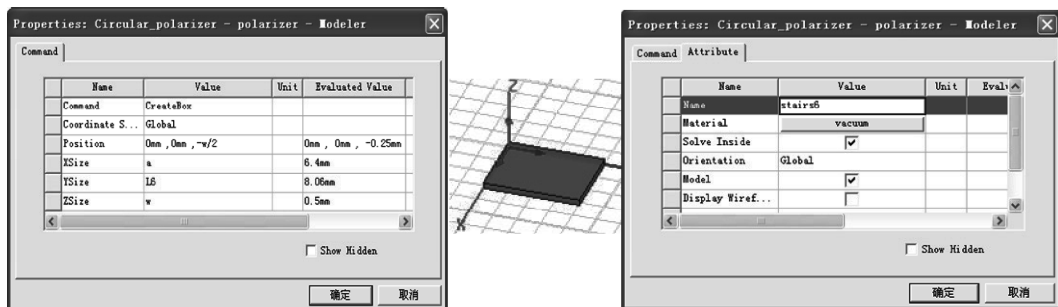


图 11-14 stairs6 的“属性”对话框

#### 2) 创建阶梯单元模型 stairs5

选中刚刚创建的模型 stairs6，然后选择“Edit→Copy”命令和“Edit→Paste”命令，此时便复制了一个与 stairs6 一样大小的长方体模型，在操作历史树中可以看到，其系统默认名称为 Stairs7。如图 11-15 所示，首先双击 stairs7 节点下的“Createbox”项，打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡，将其中的“Position”项修改为 0mm, L6, -w/2；在

“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 h5、L5 和 w。

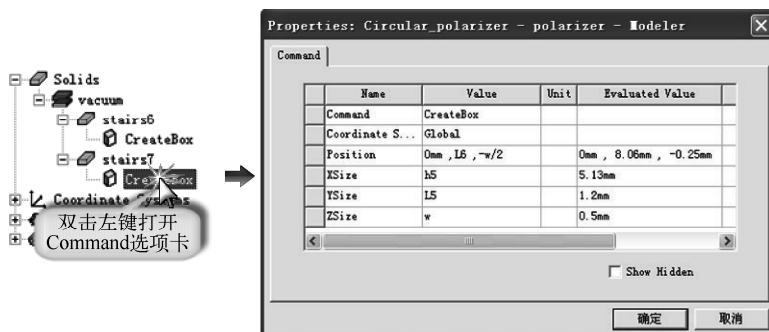


图 11-15 打开并编辑“Command”选项卡

如图 11-16 所示，双击 stairs7 打开模型“属性”对话框中的“Attribute”选项卡，将“Name”项中的 stairs7 修改为 stairs5，其他选项保持默认设置。

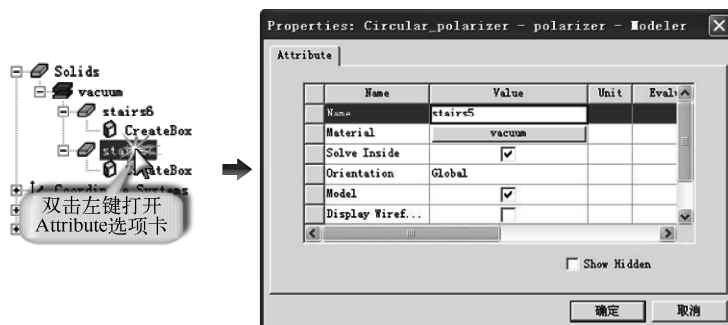


图 11-16 打开并编辑“Attribute”选项卡

此时，阶梯单元模型 stairs5 便创建完成，按下 Ctrl+D 键，以适当尺寸显示模型，如图 11-17 所示。

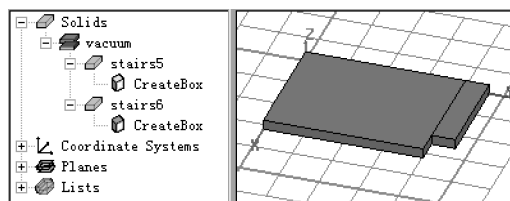


图 11-17 阶梯单元模型 stairs5 和 stairs6

### 3) 创建其他阶梯单元模型

重复 2) 中的步骤，分别编辑其他阶梯单元模型的属性设置，创建其余的阶梯单元模型，具体操作这里不再赘述。其余各阶梯单元模型的属性设置如下。

(1) stairs4: “Position”项为 0mm, L6+L5, -w/2; “XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别为 h4、L4 和 w。



(2) stairs3: “Position” 项为 0mm,  $L_6+L_5+L_4$ ,  $-w/2$ ; “XSize”、“YSize” 和 “ZSize” 项分别为  $h_3$ 、 $L_3$  和  $w$ 。

(3) stairs2: “Position” 项为 0mm,  $L_6+L_5+L_4+L_3$ ,  $-w/2$ ; “XSize”、“YSize” 和 “ZSize” 项分别为  $h_3$ 、 $L_3$  和  $w$ 。

(4) stairs: “Position” 项为 0mm,  $L_6+L_5+L_4+L_3+L_2$ ,  $-w/2$ ; “XSize”、“YSize” 和 “ZSize” 项分别为  $h_1$ 、 $L_1$  和  $w$ 。

完成以上步骤后, 各级阶梯单元模型就创建完成, 按下 **Ctrl+D** 键, 以适当尺寸显示模型, 如图 11-18 所示。

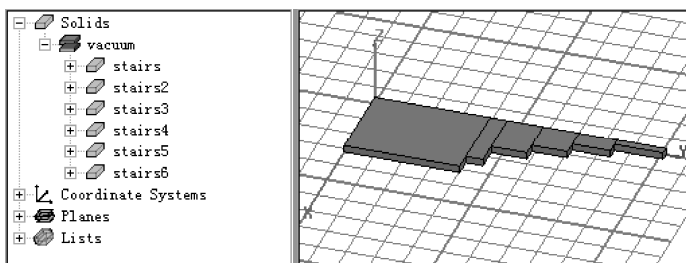



图 11-18 所有阶梯单元模型

### 第二步：合并操作生成阶梯型金属膜片

各阶梯单元模型创建完成后, 按住键盘上的 **Ctrl** 键不放, 在模型操作历史树或模型显示窗口中, 首先选中模型 stairs, 然后再选中其他的阶梯单元模型, 执行 “Modeler→Boolean→Unite” 命令, 或者单击工具栏中的按钮 , 将各阶梯单元模型合并成连续型金属阶梯型金属膜片模型, 如图 11-19 所示。

### 第三步：设置阶梯型金属膜片的材料属性

选中合并后的模型 stairs, 在模型显示窗口中单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择 “Assign→Material...” 命令, 在打开的模型材料 “属性” 对话框中选择阶梯型金属膜片的材料为 Pec, 即指定膜片为理想金属材料。设置完材料属性的阶梯型金属膜片模型如图 11-20 所示。

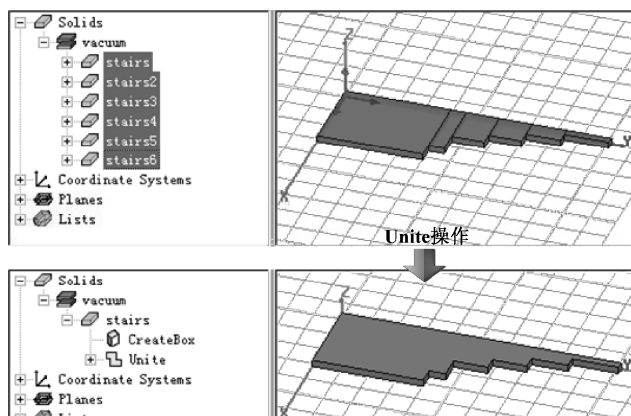


图 11-19 合并操作生成连续型金属阶梯型金属膜片模型

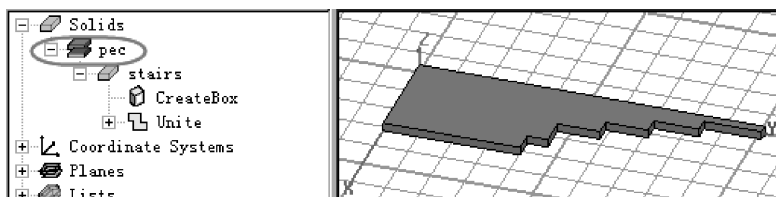



图 11-20 设置完材料属性的阶梯型金属膜片模型

至此，完成了阶梯型金属膜片模型的创建，再次按下 **Ctrl+D** 键，以适当尺寸显示模型。

### 11.5.3 创建方波导模型

首先选择绘制长方体命令“**Draw→Box**”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：在“**Command**”选项卡中，“**Position**”项设为 0mm, 0mm, -a/2, “**XSize**”、“**YSize**”和“**ZSize**”项分别输入 a, L1+ L2+L3+L4+L5+L6+lambda 和 a; “**Attribute**”选项卡中的“**Name**”项修改为 wave\_guide, 在“**Transparent**”项处，拖动滑块至 0.6 位置，再将方波导模型的透明度设置为 0.6，如图 11-21 所示。

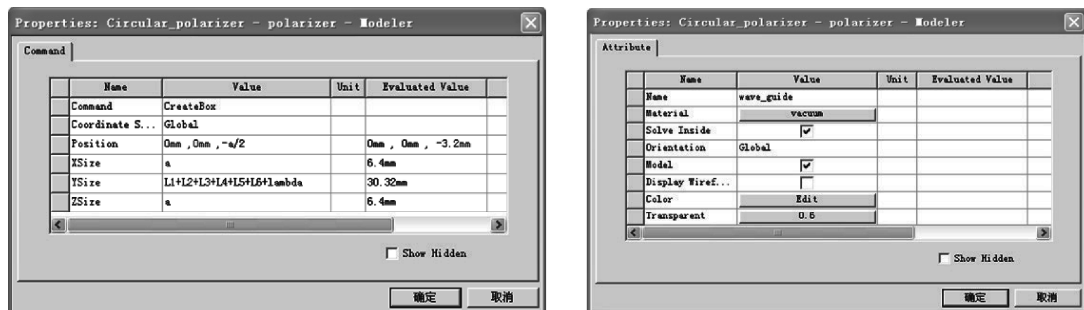


图 11-21 方波导的“属性”对话框

再次按下 **Ctrl+D** 键，以适当尺寸显示模型，如图 11-22 所示。

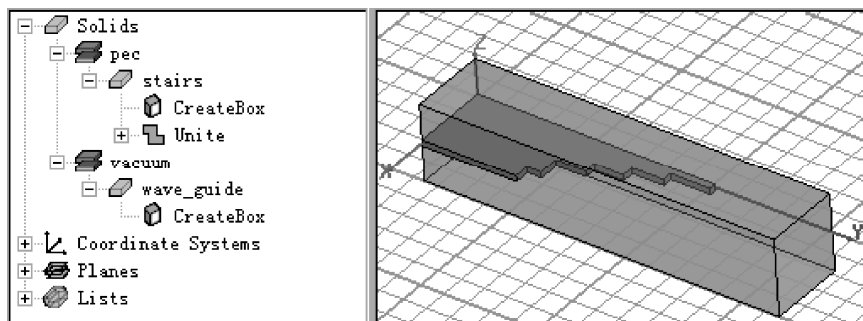



图 11-22 创建完方波导后的仿真模型



## 11.6 设置输入、输出口激励

### 11.6.1 绘制端口激励平面

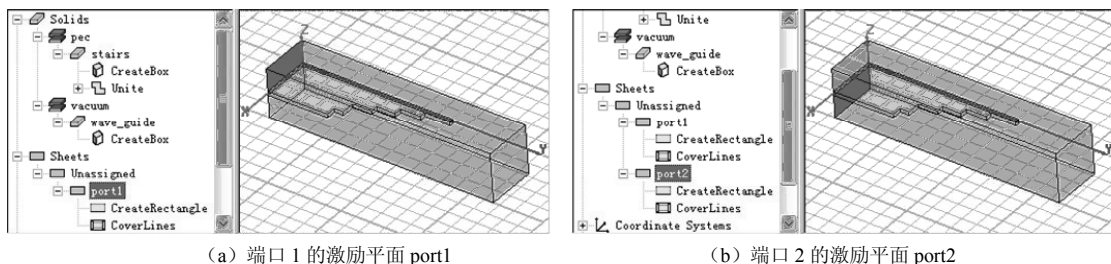
为了方便两个输入端口的激励设置，首先为两个输入端口绘制激励平面。

在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮, 执行矩形平面绘制命令后，用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。

操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 Rectangle1，位于操作历史树中的“Sheets”节点下。双击“Rectangle1”节点，打开“Attribute”对话框，将“Name”项修改为 port1，其他设置保持默认。用鼠标双击“port1”中的“Create Rectangle”项，打开“Command”选项卡，在“Command”栏中对矩形平面的结构参数进行修改和调整，如下所示。

- (1) Position: 模型结构的起始点坐标，修改为 0mm, 0mm, w/2。
- (2) Axis: 平面模型的法向坐标轴。选择 Y 轴，则平面位于与 Y 轴垂直的坐标平面内。
- (3) 平面的长宽尺寸“XSize”和“ZSize”分别修改为 a 和 (a-w)/2。

至此便完成了在输入端口 1 创建一个激励平面。重复以上步骤绘制输入端口 2 的激励平面 port2，相应的属性设置为：在“Command”选项卡中，“Position”项设为 0mm, 0mm, -w/2，“Axis”项选择 Y 轴，“XSize”和“ZSize”分别设为 a 和 -(a-w)/2；在“Attribute”选项卡中，将“Name”项修改为 port2，其他设置保持默认，如图 11-23 所示。



(a) 端口 1 的激励平面 port1

(b) 端口 2 的激励平面 port2

图 11-23 端口激励平面

### 11.6.2 设置输入端口激励

选中端口 1 的激励平面 port1，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation→Wave Port...”命令，开始进行波端口的设置。首先是“Wave Port: General (通用)”对话框，默认激励名为 WavePort1，单击“下一步”按钮继续，切换至“Wave Port: Modes (模式)”对话框，在“Number of”项输入 1，单击“Integration Line”栏中的“None”右边的倒三角形，选择“New Line...”命令来绘制积分线。选择“New Line...”命令后，进入积分线绘制模式，按住 Alt 键的同时拖动鼠标左键，将视角调整到方便选取的位置。接下来首先移动鼠标至 port1 平面下棱边的中点并单击左键来确定积分线的起始点，再将鼠标移动到平面的上棱边中点并单击鼠标左键来确定积分线的终点，如图 11-24



所示。注意，当鼠标捕捉到平面棱边中点时，会显示三角形标志。

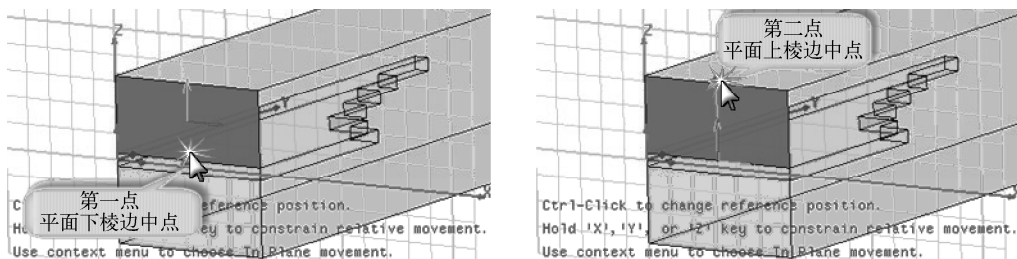


图 11-24 指定积分线的起点和终点

绘制完积分线后单击“模式”对话框中的“下一步”按钮继续，切换至“Wave Port: Post Processing (后处理)”对话框，保持默认设置，并单击“完成”按钮。

接下来选中激励平面 port2，重复以上步骤为输入端口 2 设置波端口激励。设置完成后在工程管理树中的“Excitations”节点处可以单击查看设置的波端口激励 WavePort1 和 WavePort2，如图 11-25 所示。

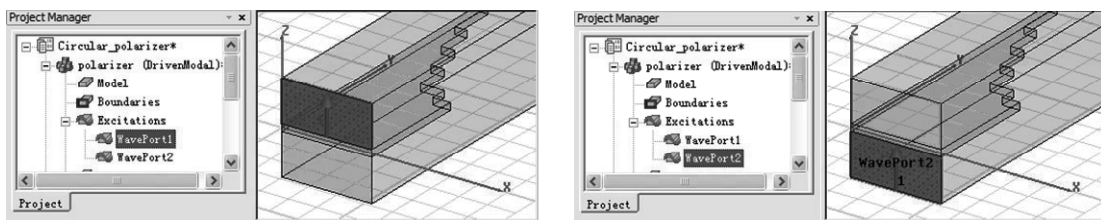


图 11-25 输入端口 1 和 2 的端口激励

### 11.6.3 设置输出端口激励

在模型显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Select Face”命令，切换至平面选择模式，按住 Alt 键并拖动鼠标左键调整视角至方波导输出口。选中方波导输出口平面，在右键菜单中选择“Assign Excitations Wave Port...”命令，开始进行输出端口激励的设置。在“通用”标签页，默认激励名为 WavePort3，单击“下一步”按钮，切换至“模式”标签页，在“Number of”项输入 2，然后在“model”项的“Integration Line”列中单击“None”，在其对应的下拉菜单中选择“New Line...”命令，在选中的输出平面上绘制第一条积分线，方向沿 Z 轴正方向，起始点分别为下棱边中点和上棱边中点；接下来在“mode2”项的“Integration Line”列中单击“None”，在其对应的下拉菜单中选择“New Line...”命令，在选中的输出平面上绘制第二条积分线，方向沿 X 轴正方向，起始点分别为右侧棱边中点和左侧棱边中点。绘制完两条积分线后，勾选模式列表下面的“Polarized E Field”选项框，单击“下一步”按钮，切换至“后处理”标签页，保持默认设置不变，最后单击“确定”按钮完成操作。

端口激励设置操作完成后，创建的端口激励 WavePort3 会显示在工程管理窗口的“Excitations”节点下，点选并查看所创建的输出端口激励 WavePort3，如图 11-26 所示。

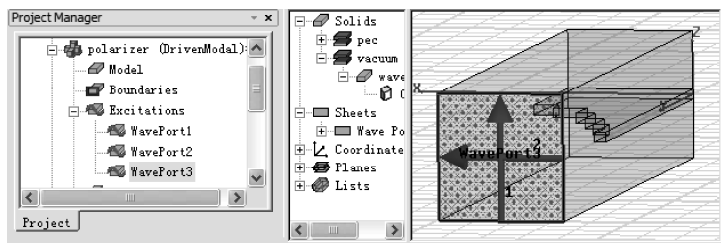



图 11-26 输出端口激励

至此，方波导圆极化器的模型创建部分就全部完成了，按下 **Ctrl+D** 键，以适当比例显示模型。

## 11.7 仿真的基本设置

### 11.7.1 求解设置

本章设计的圆极化器的工作中心频率为 30GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 30GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 11-27 所示的“Solution Setup (求解设置)”对话框。

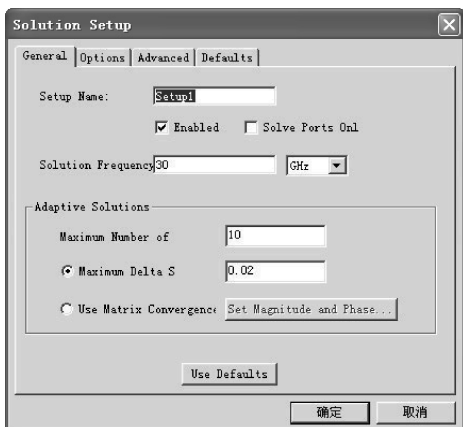



图 11-27 “Solution Setup (求解设置)”对话框

(2) 在“Solution Setup (求解设置)”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 30GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并自动添加到工程管理树的“Analysis”节点下。

### 11.7.2 扫频设置

添加一个 29~31GHz 的扫频设置，用以分析 FSS 在此频段内的传输特性。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 11-28 所示的“Edit Sweep (扫频设置)”对话框。

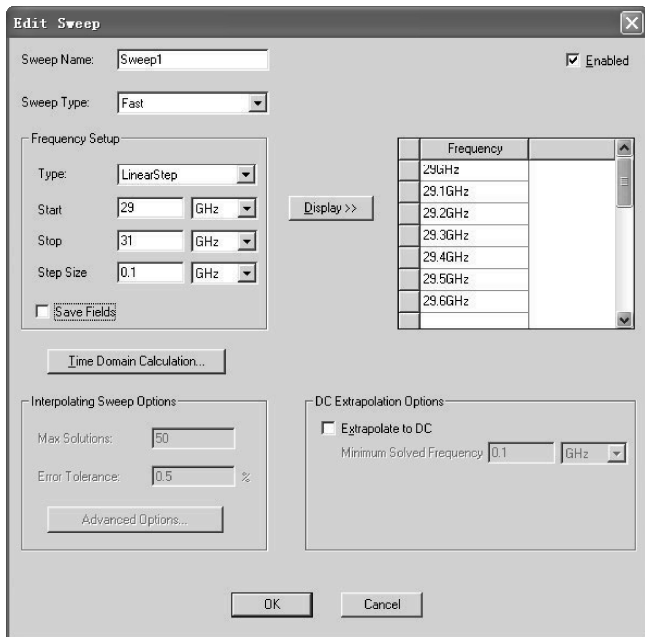


图 11-28 “Edit Sweep (扫频设置)”对话框

(2) 在“Edit Sweep (扫频设置)”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 29GHz，终止频率为 31GHz，步进长度为 0.1GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，在右侧的频率列表中便会显示扫频计算的频点。

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下。

### 11.7.3 定义输出变量

为了方便查看圆极化器两个正交场分量的幅度差和相位差，以评估圆极化器的圆极化性能，在分析计算之前，首先定义两个输出变量相位差 Delta\_Phase 和幅度差 Delta\_dB。

如图 11-29 所示，用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Output Variables...”命令，打开如图 11-30 所示的“Output Variables”对话框。



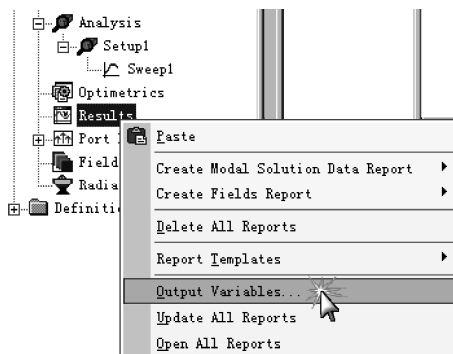


图 11-29 执行添加输出变量命令

(1) 在“Name”项中输入输出变量名 Delta\_Phase。

(2) 在“Context”栏中选择报告类型为 Modal Data，求解项为 Setup: Sweep1。

(3) 首先在“Quantity”栏中选择参数  $S(\text{WavePort3:1}, \text{WavePort1:1})$ ，在“Function”栏中选择  $\text{ang\_deg}$ ，再单击“Insert Into Expression”按钮，此时在上面的“Expression”栏中就会出现相应的参数表达式，在表达式后面单击鼠标左键，待出现光标后，在表达式后面输入减号“-”；接下来在“Quantity”栏中选择参数  $S(\text{WavePort3:2}, \text{WavePort1:1})$ ，在“Function”栏中选择  $\text{ang\_deg}$ ，再单击“Insert Into Expression”按钮。

(4) 此时“Expression”栏中的表达式变为  $\text{ang\_deg}(S(\text{WavePort3:1}, \text{WavePort1:1})) - \text{ang\_deg}(S(\text{WavePort3:2}, \text{WavePort1:1}))$ 。

(5) 单击“Add...”按钮添加输出变量 Delta\_Phase 到变量列表中，至此输出变量就添加完成。

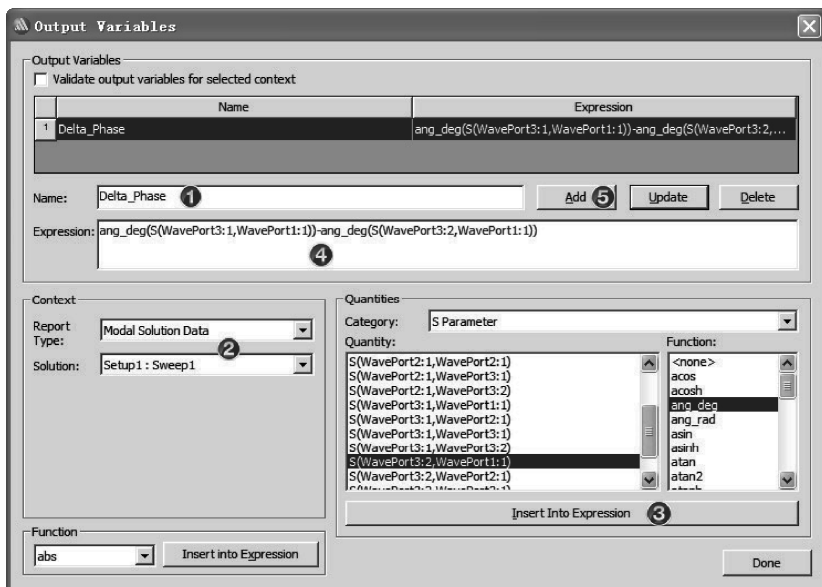


图 11-30 定义输出变量 Delta\_Phase

重复以上步骤添加输出变量 Delta\_dB。其最终表达式为  $\text{dB}(\text{S}(\text{WavePort3:1}, \text{WavePort1:1})) - \text{dB}(\text{S}(\text{WavePort3:2}, \text{WavePort1:1}))$ ，最后单击“Add...”按钮将其添加至变量列表，如图 11-31 所示。

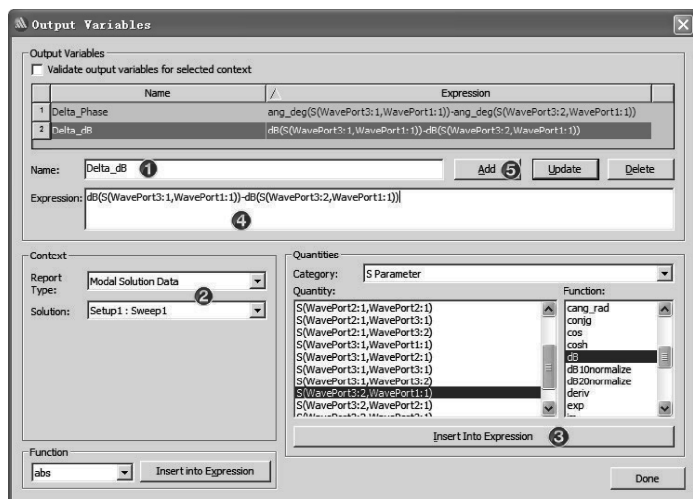





图 11-31 定义输出变量 Delta\_dB

最后单击对话框右下角的“Done”按钮确认完成定义操作。

#### 11.7.4 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了。但一般在正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口（如图 11-32 所示）。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的；如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

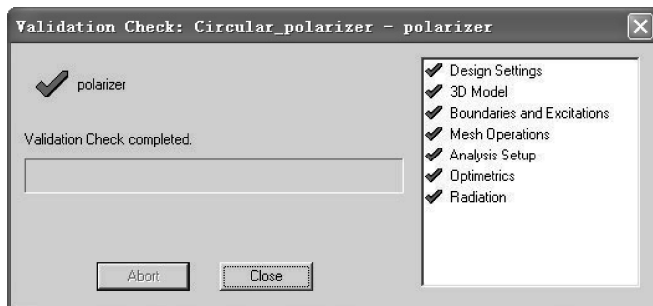



图 11-32 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置项“Setup1”上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 11-33 所示。

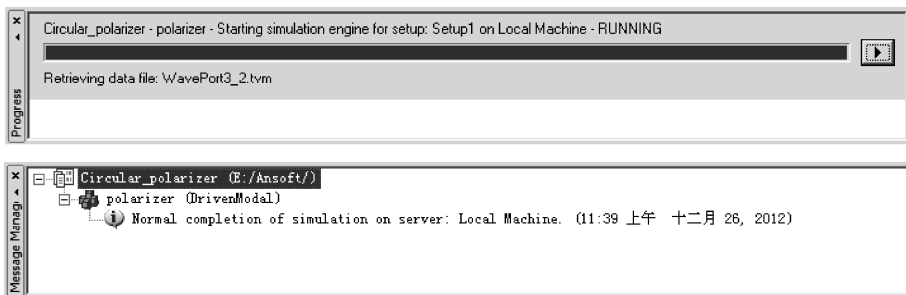


图 11-33 仿真分析进程窗口和信息管理窗口

## 11.8 查看仿真分析结果

### 11.8.1 查看计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 11-34 所示，打开如图 11-35 左图所示的“Solutions”对话框，然后点选切换至“Convergence”选项卡，并在显示方式“View”项处分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

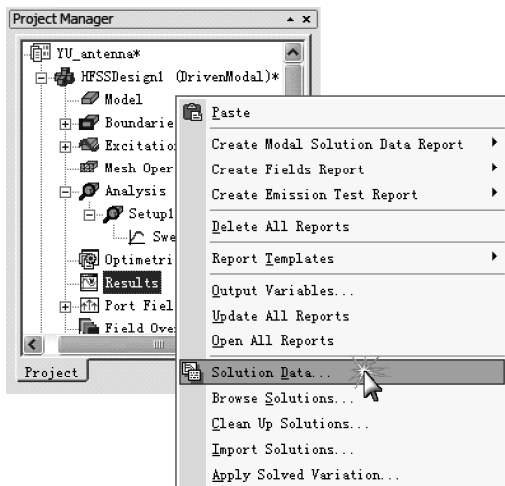


图 11-34 选择查看求解数据命令

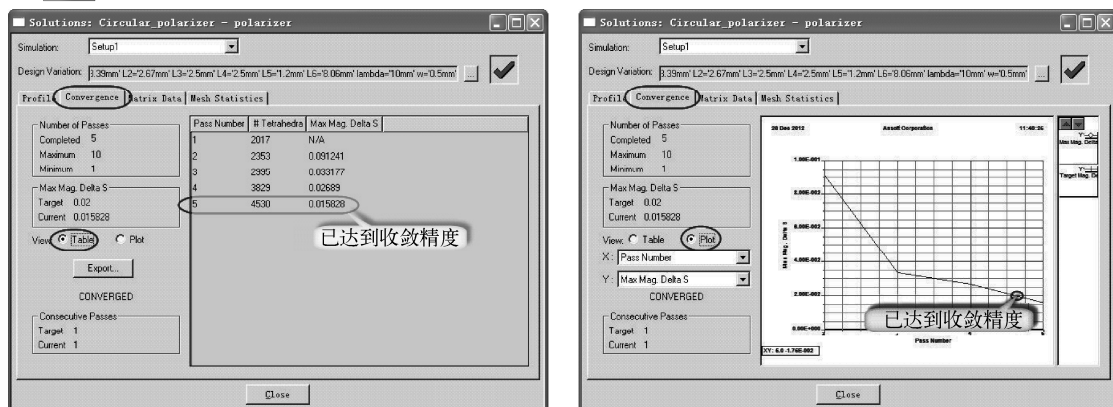


图 11-35 迭代收敛情况图表报告

由图 11-35 右图可知, 求解计算在迭代到第 5 次时达到了收敛精度, 因此仿真后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后, 求解还没有收敛, 则需要进一步增加迭代次数继续进行计算直到收敛为止。

## 11.8.2 查看圆极化特性

对于圆极化器来说, 要想产生圆极化波, 必须有两个正交、等幅、相位差  $90^\circ$  的场分量。接下来就来查看一下仿真的圆极化器在单端口 WavePort1 激励时, 两个正交分量的幅度差和相位差。

### 1. 查看圆极化器两正交分量的相位差

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令, 打开如图 11-36 所示的“Report”对话框。

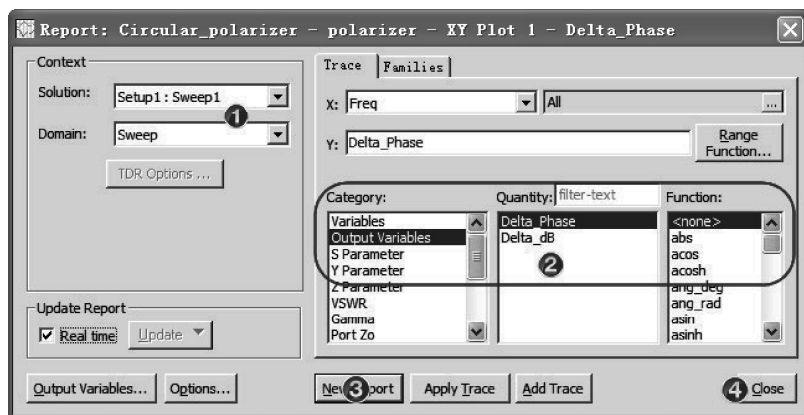


图 11-36 “Report”对话框

(1) 在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项, 在“Category”栏中选择参数类型

为 Output Variables, 在“Quantity”栏中选择变量 Delta\_Phase, 在“Function”栏中选择 <none>, 单击“New Report”按钮生成报告图形曲线。最后单击“Close”按钮关闭对话框, 生成的图形如图 11-37 所示。

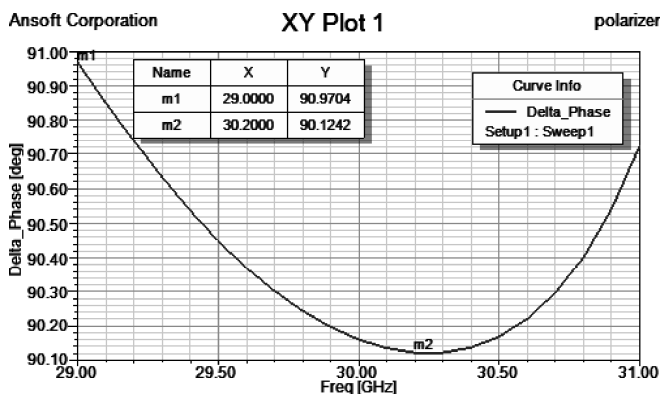



图 11-37 圆极化器正交分量的相位差

在图形结果窗口中单击鼠标右键, 选择“Marker→Add mark”命令, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 标注出 Delta\_Phase 曲线的最大值和最小值点。从图 11-37 中可以看出, 当频率为 29GHz 时, Delta\_Phase 的最大值为 90.97deg (90.97°), 最小值位于 30.2GHz 时, 该值为 90.12deg (90.12°)。

## 2. 查看圆极化器两正交分量的幅度差

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report→Rectangular Plot”命令, 打开如图 11-38 所示的“Report”对话框。

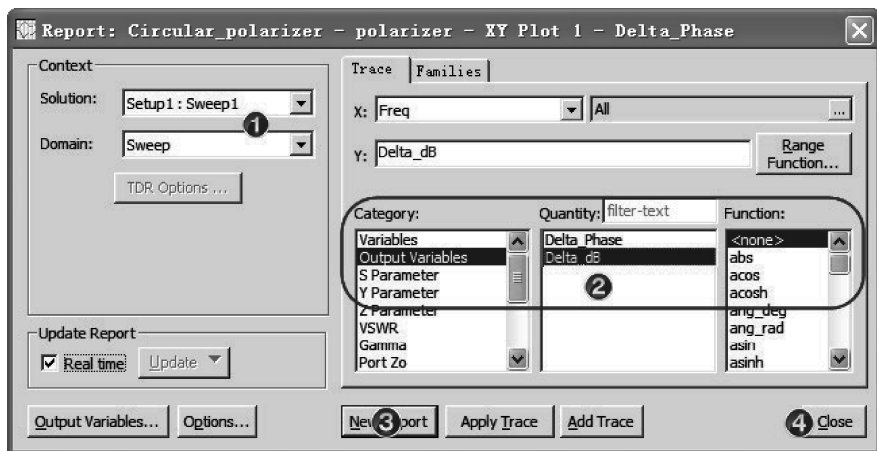


图 11-38 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项, 在“Category”栏中选择参数类型为



Output Variables, 在“Quantity”栏中选择变量 Delta\_dB, 在“Function”栏中选择<none>, 单击“New Report”按钮生成报告图形曲线。最后单击“Close”按钮关闭对话框, 生成的图形如图 11-39 所示。

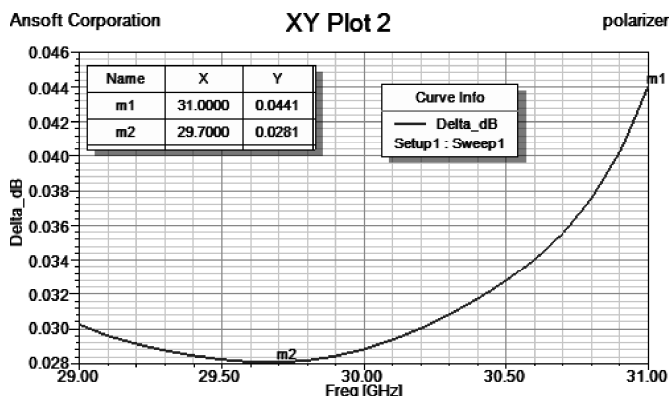



图 11-39 圆极化器正交分量的幅度差

在图形结果窗口中单击鼠标右键, 选择“Marker→Add mark”命令, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 标注出 Delta\_Phase 曲线的最大值和最小值点。从图 11-39 中可以看出, 当频率为 31GHz 时, Delta\_dB 的最大值为 0.044dB, 最小值位于 29.7GHz 时, 该最小值为 0.028deg (0.028°)。

### 3. 结果讨论

由图 11-37 和图 11-39 可以看出, 在 29~31GHz 工作频带内, 设计的阶梯型金属膜片圆极化器两正交分量的相位差偏离 90° 的范围小于 1°, 幅度差小于 0.05dB, 满足圆极化器指标要求。

## 第12章 Wilkinson 功分器仿真实例

功分器全称功率分配器，英文名为 Power divider，是一种将一路输入信号能量分成两路或多路输出相等或不相等能量的器件，也可反过来将多路信号能量合成一路输出，此时它可称为合路器。功分器的技术指标包括频率范围、承受功率、主路到支路的分配损耗、输入输出间的插入损耗、支路端口间的隔离度、每个端口的电压驻波比等。

### 12.1 Wilkinson 功分器的原理分析

简单的二等功分器属于三端口网络。由于普通的无耗互易三端口网络不可能达到完全匹配，且输出端口间无隔离，而工程上对信号之间的隔离要求很高，所以需要采用混合型的功率分配器，即 Wilkinson（威尔金森型）功分器。Wilkinson 功分器的工作原理主要是在简单功分器中引入隔离电阻，从而实现了信号链路的匹配和高度隔离。引入隔离电阻后，功分器变为有耗的三端口网络。从三端口网络的基本性质可知，有耗三端口网络可以做到完全匹配且输出端口之间具有隔离，从而改善了普通功分器的不足。同样，该类型的功分器可以实现任意的功率分配比，且可方便地用微带线或带状线来实现。

如图 12-1 所示是两路微带线威尔金森功分器示意图。

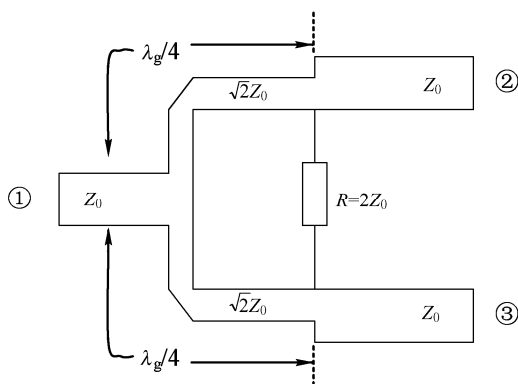


图 12-1 两路微带线威尔金森功分器示意图

图中， $Z_0$  是特性阻抗， $\lambda_g$  是信号的波导波长， $R$  是隔离电阻。当信号从左端的一号端口输入时，功率从二号端口和三号端口等功率输出。如果有必要，输出功率可按一定比例分配，并保持电压同相，电阻  $R$  上无电流，不吸收功率。若二号端口或三号端口有失配，则反射功率通过分支叉口和电阻两路到达另一支路的电压等幅反相而抵消，在此点没有输出，从而可保证两输出端口有良好的隔离。

考虑一般情况（比例分配输入功率），设三号端口  $P_3$  和二号端口  $P_2$  的输出功率比为



$k^2$ ，即

$$k^2 = \frac{P_3}{P_2} \quad (12-1)$$

由于一号端口到二号端口与一号端口到三号端口的线长度相等，故二号端口的电压  $U_2$  与三号端口的电压  $U_3$  相等，即  $U_2 = U_3$ 。二号端口与三号端口的输出功率与电压的关系为

$$\begin{cases} P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2} \\ P_3 = \frac{U_3^2}{Z_3} \end{cases} \quad (12-2)$$

将式 (12-2) 代入式 (12-1)，得

$$\frac{U_3^2}{Z_3} = k^2 \frac{U_2^2}{Z_2} \quad (12-3)$$

即

$$Z_2 = k^2 Z_3 \quad (12-4)$$

式中， $Z_2$ 、 $Z_3$  为二号端口和三号端口的输入阻抗。

若选择

$$\begin{cases} Z_2 = kZ_0 \\ Z_3 = \frac{Z_0}{k} \end{cases} \quad (12-5)$$

则可以满足式 (12-4)。为了保证一号端口匹配，应有

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_0} &= \frac{Z_2}{Z_0^2} + \frac{Z_3}{Z_0^2} \\ \frac{1}{Z_0} &= \frac{kZ_0}{Z_0^2} + \frac{Z_3}{kZ_0^2} \end{aligned} \quad (12-6)$$

同时考虑到

$$\frac{Z_{02}^2}{Z_2} = k^2 \frac{Z_{03}^2}{Z_3} \quad (12-7)$$

则有

$$\frac{1}{Z_0} = (k^{-2} + 1) \frac{Z_3}{Z_0^2} = (k^{-2} + 1) \frac{Z_0}{K_{03}^2} \quad (12-8)$$

因此可得到

$$\begin{aligned} Z_{03} &= \sqrt{\frac{1+k^2}{k^3}} Z_0 \\ Z_{02} &= \sqrt{k(1+k^2)} Z_0 \end{aligned} \quad (12-9)$$

为了实现二号端口和三号端口的隔离，即二号端口或三号端口的反射波不会进入三号端口或二号端口，可选择





$$R = kZ_0 + \frac{Z_0}{k} = \frac{1+k^2}{k}Z_0 \quad (12-10)$$

在等功率分配的情况下, 即  $P_2=P_3$ ,  $k=1$ , 有

$$\begin{cases} Z_2 = Z_3 = Z_0 \\ Z_{02} = Z_{03} = \sqrt{2}Z_0 \\ R = 2Z_0 \end{cases} \quad (12-11)$$

为了增加隔离度, 在两路输出之间添加了一个  $R=2Z_0$  的电阻, 通过以上分析就可以得到 Wilkinson 功分器的所有参数值, 接下来就可以进行设计了。

## 12.2 HFSS 仿真设计概述

本章利用 HFSS 软件仿真设计一个微带型 Wilkinson 二功分器, 其中心工作频率为 2.45GHz, 无限局域网、蓝牙等无线网络均可工作在此频段上。介质板采用双面敷铜的玻璃纤维板 (FR4), 相对介电常数为 4.4, 厚度为 1.5mm, 由微带计算工具可得到特性阻抗为  $Z_0=50\Omega$  的微带线宽为 2.8mm, 特性阻抗为  $\sqrt{2}Z_0=70.7\Omega$  的微带线宽约为 1.52mm, 对应的四分之一导波波长约为 42.35mm。微带线采用二维平面模型构建, 赋予理想导体边界以模拟金属微带线, 隔离电阻  $R=2Z_0$ , 利用集总 RLC 边界条件实现。HFSS 仿真模型如图 12-2 所示。

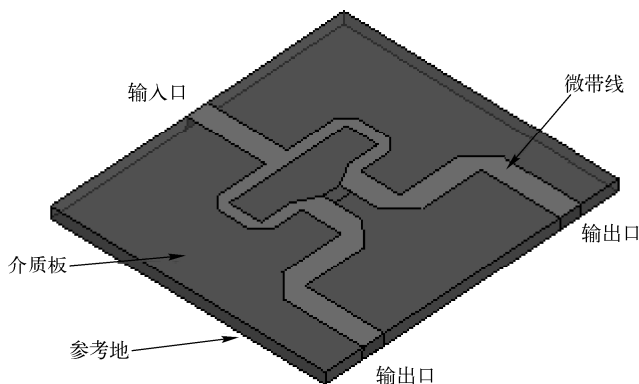


图 12-2 HFSS 仿真模型

HFSS 仿真的相关设置如下。


- (1) 求解类型: 模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位: 毫米 (mm)。
- (3) 激励类型: 集总端口激励 (Lumped Port)。
- (4) 边界条件: 理想导体边界, 辐射边界。
- (5) 求解及扫频设置: 求解频率为 2.45GHz, 扫频范围为 2~2.9GHz。
- (6) 查看参数: 匹配特性, 隔离特性及平分特性; 绘制不同端口输入时的场分布图。



下面介绍详细的仿真设计过程。

## 12.3 创建工程设计

### 12.3.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件。当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中 HFSSDesign1，选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 2.45\_divider.HFSS。

### 12.3.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 12-3 所示。

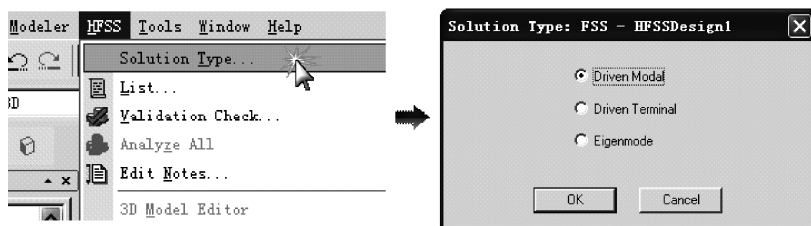


图 12-3 设置求解类型

### 12.3.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 12-4 所示。

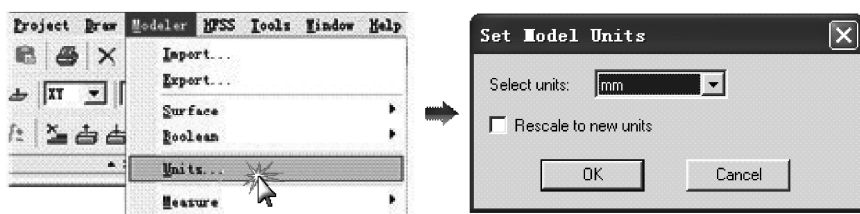


图 12-4 设置模型尺寸单位



### 12.3.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit Properties of new primitives”复选框，如图 12-5 所示。

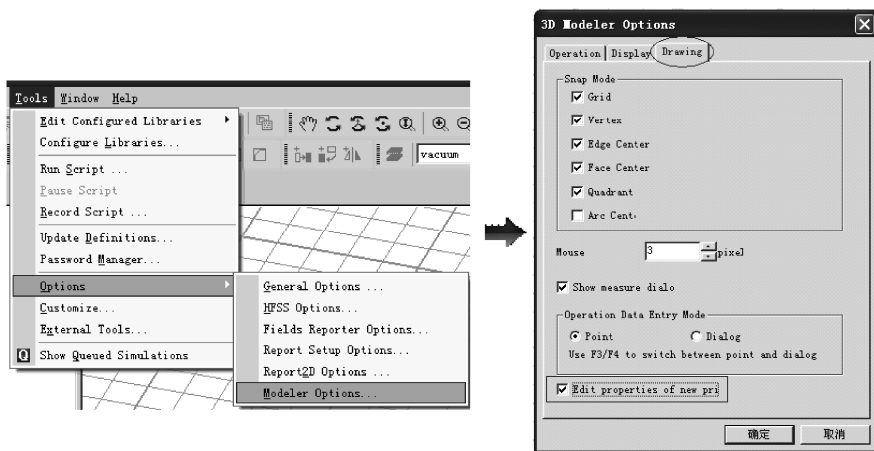


图 12-5 设置“3D Modeler Options”对话框

勾选此项是为了在建模操作过程中，创建完一个新的物体模型后，能够自动弹出物体模型的“属性”对话框，以便进行查看和编辑操作；如果不勾选此项，则不会自动弹出模型“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型属性进行操作，或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令，分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

## 12.4 创建功分器仿真模型

### 12.4.1 创建微带线模型

为了方便下一步的建模工作，微带线模型的创建顺序如图 12-6 所示。

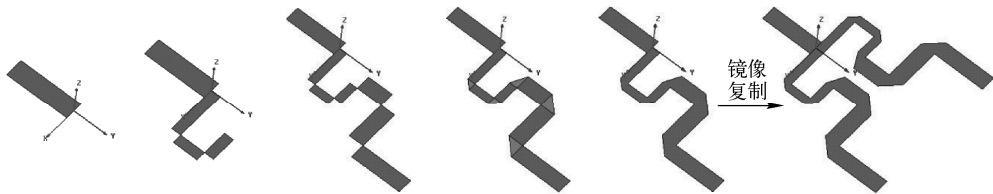



图 12-6 微带线的创建顺序

下面按照图中顺序进行建模操作。

首先创建输入端微带线。在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上

的按钮，执行矩形平面绘制命令后，用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 **Rectangle1**，并弹出矩形平面的“属性”对话框。在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：对“Command”选项卡的起始点位置“Position”项；对称轴“Axis”项；“XSize”长度及“YSize”长度项进行设置。

(1) Position: -1.44mm, 0mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: 2.88mm; YSize: -10mm。

将“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 **Patch**，设置完成后的属性对话框如图 12-7 所示，单击“确定”按钮完成操作。

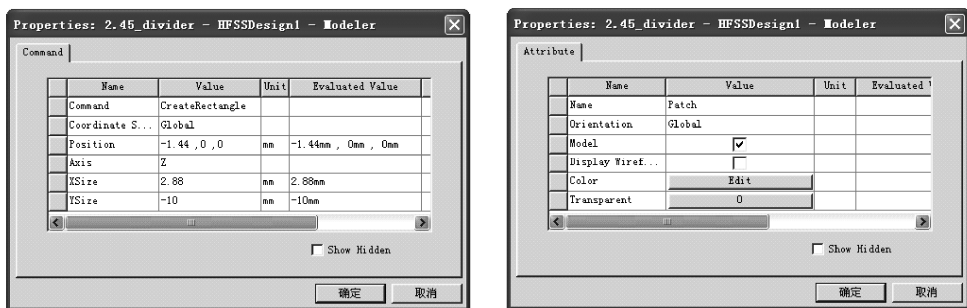


图 12-7 微带线的“属性”对话框

然后重复以上步骤依次创建其他部分的微带线模型，创建操作过程就不再详细给出了。按照创建顺序，其他各段微带线的属性参数如下。

(2) Position: 0mm, 0mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: 8mm; YSize: 1.5mm。

(3) Position: 8mm, 1.5mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: 1.5mm; YSize: 4mm。

(4) Position: 8mm, 5.5mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: -4mm; YSize: 1.5mm。

(5) Position: 4mm, 7mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: -2.88mm; YSize: 5mm。

(6) Position: 4mm, 12mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: 8mm; YSize: 2.88mm。

(7) Position: 12mm, 14.88mm, 0mm; Axis: Z 轴; XSize: 2.88mm; YSize: 10mm。

创建完微带线模型后，按下 **Ctrl+D** 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 12-8 所示。

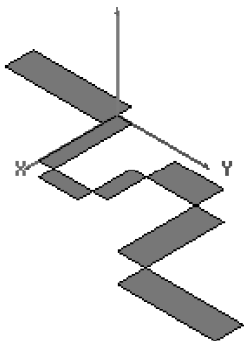



图 12-8 微带线模型



## 12.4.2 创建微带线的切角模型

完成前述操作后，下面开始创建微带线弯折处的切角。可以通过多段线工具依次点选微带线弯折处的三个模型顶点，形成一个闭合的三角形模型。第一个弯折处切角的创建具体操作如下。

在主菜单栏中选择“Draw→line”命令或单击工具栏上的按钮，执行创建线段模型命令后，放大显示微带线第一个弯折，然后用鼠标在模型窗口中依次点选第一个微带线弯折处模型顶点，形成闭合曲线后双击鼠标左键，或者单击鼠标右键选择“Done”命令确认操作，生成三角形切角模型，如图 12-9 所示。

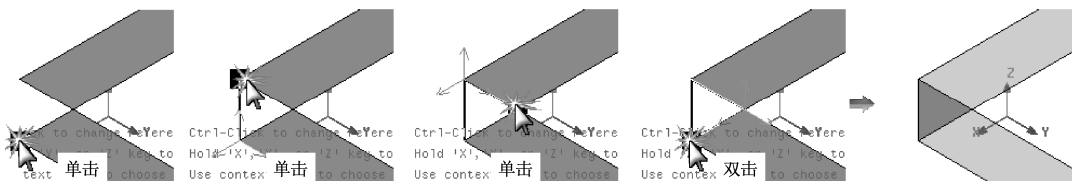


图 12-9 微带线弯折处切角的创建步骤

重复以上步骤创建其他微带线弯折处的切角模型。操作完成后按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，此时的模型如图 12-10 所示。

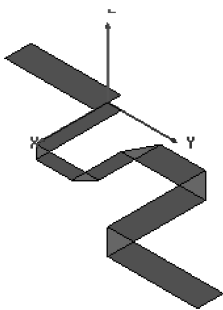




图 12-10 微带线及切角模型

## 12.4.3 合并模型及镜像复制

按住键盘的 Ctrl 键，首先选中第一段微带模型 Patch，然后再选中其他微带和切角模型，执行“Modeler→Boolean→Unite”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，将模型组合在一起形成一个名为 Patch 的微带线模型。

接下来进行镜像复制操作以生成另一侧的微带模型。首先选中组合模型 Patch，然后执行“Edit→Duplicate→Mirror”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，命令执行后，进入镜像平面法向量绘制状态。首先单击坐标轴原点，然后沿 X 轴正方向移动鼠标，在任意点单击鼠标左键，弹出镜像复制的“属性”对话框，如图 12-11 左边所示，按照图中参数



进行设置, 复制完的模型如图 12-11 右边所示。

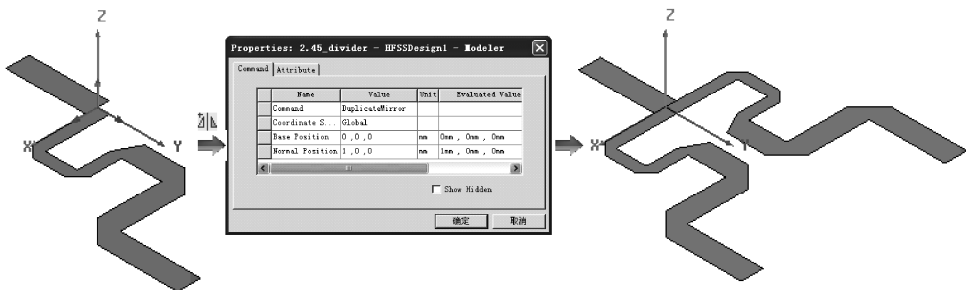




图 12-11 镜像复制设置及模型

复制操作完成后, 按住 Ctrl 键选中模型 Patch 和复制生成的模型 Patch\_1, 执行“Modeler→Boolean→Unite”命令, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 将模型组合在一起形成完整的微带线模型。然后单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Perfect E”命令, 打开“Perfect E Boundary”对话框, 将“Name”项改为 PerfE\_Patch, 最后单击“OK”按钮完成操作, 即给平面分配了理想导体边界条件, 这样就可以用来模拟金属微带线了。

#### 12.4.4 创建介质基板

(1) 选择绘制长方体命令“Draw→Box”, 或者单击工具栏中的快捷命令按钮, 进入长方体模型创建状态。

(2) 在模型显示窗口中创建一个任意大小的长方体模型。

(3) 在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑, 具体操作为: “Command”选项卡的中心点位置设为-20mm, -10mm, 0, “XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 40mm、34.88mm 和-1.5mm; “Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 Substrate, 单击“Transparent”项“Value”列中的按钮, 调整滑块位置, 将模型透明度设置为 0.6, 其他选项保持默认设置不变, 单击“确定”按钮完成介质基板的创建, 如图 12-12 所示。

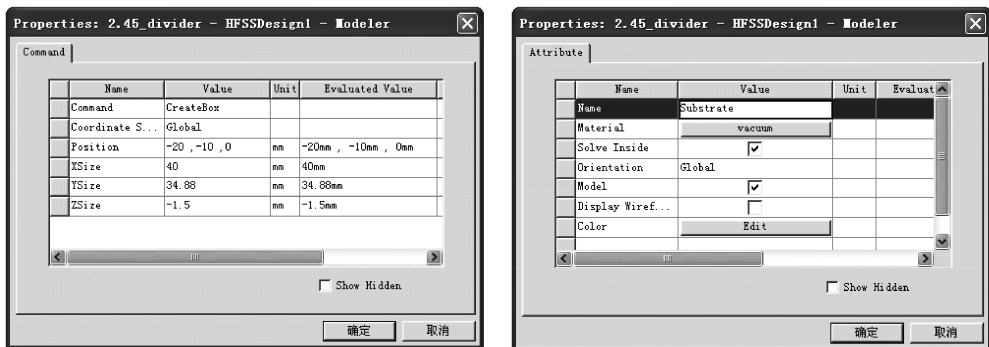


图 12-12 介质基板的“属性”对话框

(4) 选中创建好的介质基板模型, 单击鼠标右键, 在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令, 打开材料“属性”对话框。选择介质基板材料为 FR4\_epoxy, 其对应的相对介电常数值为 4.4, 单击“确定”按钮关闭对话框, 如图 12-13 所示。

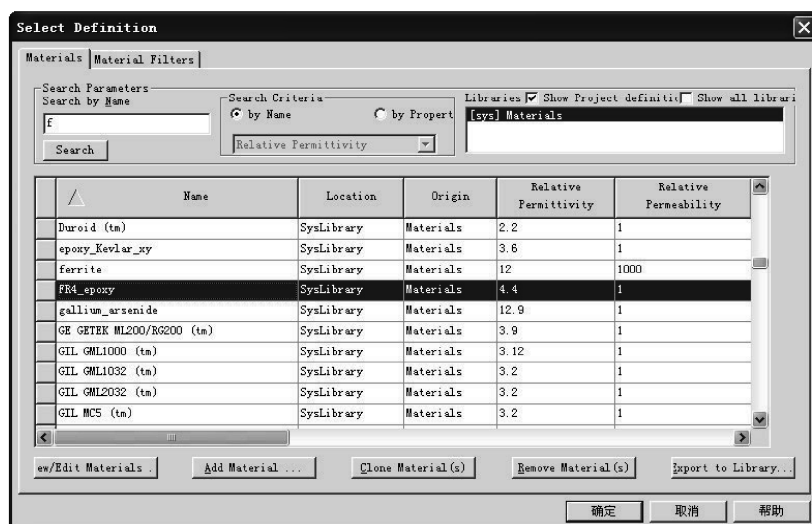



图 12-13 定义介质基板模型的材料属性

## 12.4.5 参考地平面

在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮, 执行矩形平面绘制命令后, 用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点, 然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后, 系统自动生成一个矩形平面, 其默认名称为 Rectangle1, 并弹出矩形平面的“属性”对话框。在弹出的属性对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑, 具体操作为: “Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为-20mm, -10mm, -1.5mm, 对称轴“Axis”项设为 Z 轴; “XSize”长度设为 40mm; “YSize”长度设为 34.88mm; “Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 GND, 单击“确定”按钮完成操作, 如图 12-14 所示。

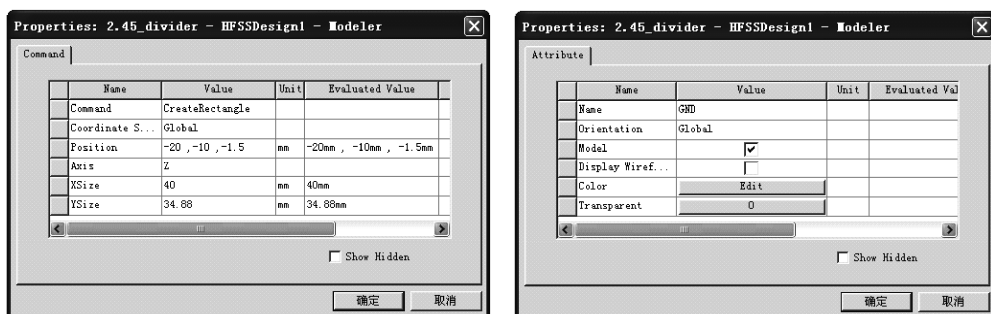


图 12-14 参考地平面的“属性”对话框

参考地平面创建完成后,选中 GND 平面模型,然后单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundary Perfect E”命令,打开“Perfect E Boundary”对话框,将“Name”项改为 PerfE\_GND,单击“OK”按钮完成操作,如图 12-15 所示,即给平面分配了理想导体边界条件,这样就可以用来模拟理想薄导体了。

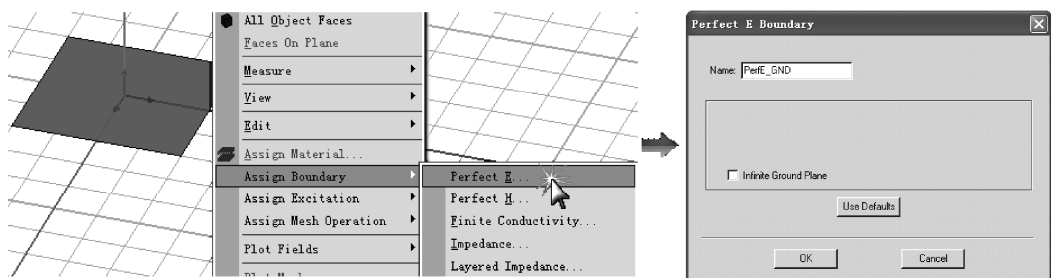


图 12-15 设置地平面 GND 为理想导体边界

按住键盘的 Alt 键不放,移动鼠标至显示窗口的右上角区域并双击鼠标左键调整视角,然后再次按下 Ctrl+D 键,以适当比例显示模型,如图 12-16 所示。

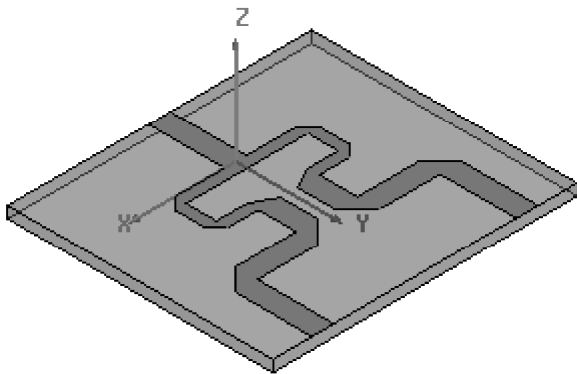



图 12-16 功分器的仿真模型

## 12.5 设置激励及边界条件

### 12.5.1 设置集总端口激励

#### 1. 创建端口激励平面

为了给微带线设置端口激励,需要给输入、输出端口添加激励平面。

首先添加输入端口平面。在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮,执行矩形平面绘制命令后,用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点,然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后,系统自动生成一个矩形平面,其默认名称为 Rectangle1,并弹出矩形“属性”对话框。在弹出的模型“属性”





对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为-1.44mm，-10mm，0，对称轴“Axis”项设为 Y 轴，X 轴向长度设为 2.88mm，Z 轴向长度设为-1.5mm；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 port1，单击“Color”选项中的“Edit”按钮，在弹出的调色窗口选择红色，单击“确定”按钮完成操作。

其次添加输出端口 2 的激励平面。重复以上步骤，并将平面属性设置为：“Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为 12mm，24.88mm，0；对称轴“Axis”项设为 Y 轴，X 轴向长度设为 2.88mm，Z 轴向长度设为-1.5mm；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 port2，单击“Color”选项中的“Edit”按钮，在弹出的调色窗口选择红色，单击“确定”按钮完成操作。

最后添加输出端口 3 的激励平面。重复以上步骤，并将平面属性设置为：“Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为-12mm，24.88mm，0，对称轴“Axis”项设为 Y 轴，X 轴向长度设为-2.88mm，Z 轴向长度设为-1.5mm；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 port3，单击“Color”选项中的“Edit”按钮，在弹出的调色窗口选择红色，单击“确定”按钮完成操作。

至此便完成了在微带线输入/输出口与参考底面之间创建激励平面的操作。

## 2. 设置集总端口激励

在工具栏中单击快捷放大按钮，此时鼠标变为十字形状并进入选择状态。移动鼠标至输入端口平面附近，按住鼠标左键拖拉出一个矩形框将输入端口平面包含在内，单击鼠标左键确定，此时将会放大显示所选区域。反复以上操作直到可以看清所创建的端口激励平面为止，再次单击按钮退出放大模式。

选中刚刚创建好的 port1 平面（既可以在放大显示状态下直接用鼠标点选该平面，也可以在操作历史树的“ Sheets ”节点下选择激励平面 port1 的名称），在选中的状态下在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation”中的“Lump Port”命令，弹出“Lumped Port: General（通用）”对话框，在“Name”项默认激励名称为 LumpPort1，单击“下一步”按钮继续，在弹出的“Lumped Port: Modes（模式）”对话框中单击“Integration Line”栏中“None”右边的倒三角形，从其下拉菜单中选择“New Line...”命令来绘制积分线，如图 12-17 所示。

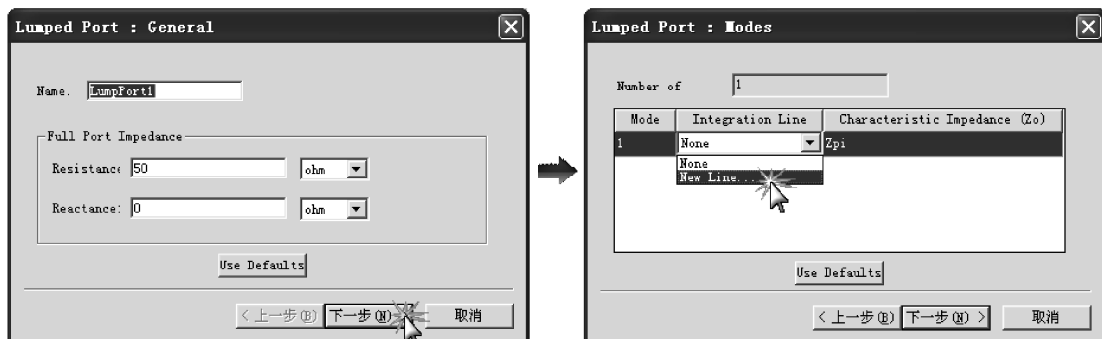


图 12-17 添加集总端口激励

选择“New Line...”命令后，进入积分线绘制模式。首先在 HFSS 界面最下端的状态栏的“X”、“Y”和“Z”文本框中输入积分线起点坐标(0,-10,-1.5)，然后按 Enter 键确定；紧接着在状态栏的“dX”、“dY”和“dZ”文本框内分别输入积分线终点的相对坐标(0,0,1.5)，再次按 Enter 键确认，两次输入状态如图 12-18 所示。

Enter the vertex	X:	0	Y:	-10	Z:	-1.5
Enter the vertex	dX:	0	dY:	0	dZ:	1.5

图 12-18 绘制端口 1 积分线时的状态栏

绘制完积分线后单击“模式”对话框中的“下一步”按钮继续，弹出“Lumped Port: Post Processing (后处理)”对话框，保持默认设置，并单击“完成”按钮，如图 12-19 所示。

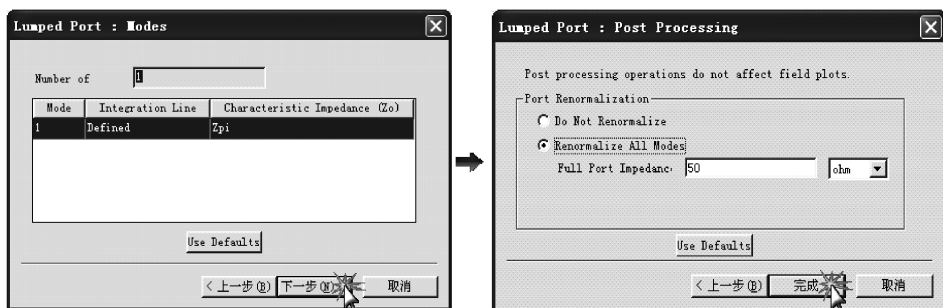


图 12-19 指定归一化端口阻抗

端口激励设置操作完成后，创建的端口激励 LumpPort1 会显示在工程管理窗口的“Excitations”节点下，点选并局部放大查看所创建的端口激励，如图 12-20 所示。

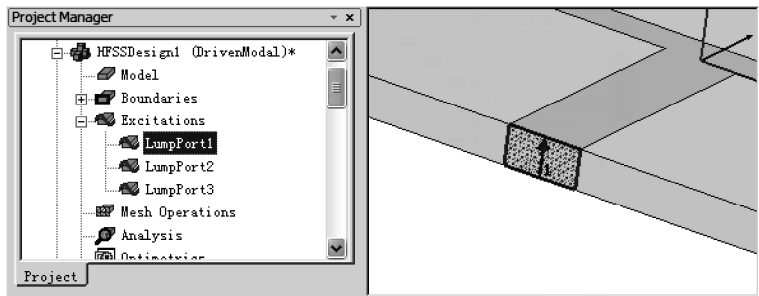


图 12-20 点选并查看 LumpPort1 端口激励

再次按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。

然后设置输出端口 2 的端口激励。选中端口 2 的激励平面模型 port2，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation”中的“Lump Port”命令，在“Lumped Port: General (通用)”对话框中，“Name”项默认激励名称为 LumpPort2，单击“下一步”按钮继续，在弹出的“Lumped Port: Modes (模式)”对话框中，单击“Integration Line”栏

中的“None”右边的倒三角形，选择“New Line...”命令后，进入积分线绘制模式。首先在 HFSS 界面最下端的状态栏的“X”、“Y”和“Z”文本框中输入积分线起点坐标(13.44,24.88,-1.5)，然后按 Enter 键确定；紧接着在状态栏的“dX”、“dY”和“dZ”文本框内分别输入积分线终点的相对坐标(0,0,1.5)，再次按 Enter 键确认，两次输入状态如图 12-21 所示。

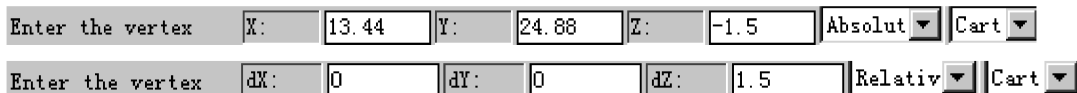


图 12-21 绘制端口 2 积分线时的状态栏

最后设置输出端口 3 的端口激励。选中端口激励平面 Port3，重复以上步骤，进入积分线绘制模式后，首先在 HFSS 界面最下端的状态栏的“X”、“Y”和“Z”文本框中输入积分线的起点坐标(-13.44,24.88,-1.5)，然后按 Enter 键确定；紧接着在状态栏的“dX”、“dY”和“dZ”文本框内分别输入积分线终点的相对坐标(0,0,1.5)，再次按 Enter 键确认，两次输入状态如图 12-22 所示。

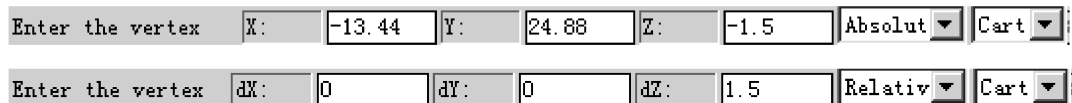



图 12-22 绘制端口 3 积分线时的状态栏

## 12.5.2 设置集总 RLC 边界

对于两路输出微带线之间的隔离电阻 R，可以利用 HFSS 中的集总 RLC 边界来进行模拟。

首先在两路微带线之间创建一个平面模型，作为边界条件的载体。在主菜单栏中选择“Draw→Rectangle”命令或单击工具栏上的按钮，执行矩形平面绘制命令后，用鼠标在模型窗口中任意点选矩形平面的起始点，然后拖动鼠标选定第二个点绘制一个任意大小的矩形平面。操作完成后，系统自动生成一个矩形平面，其默认名称为 Rectangle1，并弹出矩形“属性”对话框。在弹出的模型“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的起始点位置“Position”项设为 1.12mm, 7mm, 0；对称轴“Axis”项设为 Z 轴，X 轴向长度设为-2.24mm，Y 轴向长度设为 1.5mm；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 R，单击“Color”选项中的“Edit”按钮，在弹出的调色窗口选择红色，最后单击“确定”按钮完成操作。

其次选中刚刚创建的平面模型 R，在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Boundaries”项中的“Lumped RLC”命令，弹出“Lumped RLC Boundary”对话框，默认激励名称为 LumpRLC1，勾选“Resistance”项前面的复选框，并输入电阻值 100，再单击“Current flow”项后面的倒三角形，选择“New Line”命令，如图 12-23 所示，进入定义电流方向矢量状态。首先在状态栏中输入起始点坐标(1.12,7.75,0)，再按 Enter 键确



认,紧接着输入相对坐标(-2.24,0,0),输入完成后按 Enter 键完成操作回到对话框,其他选项不变,单击“确定”按钮完成操作。

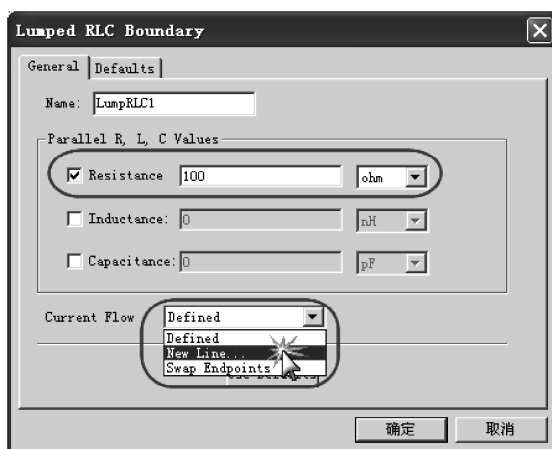


图 12-23 Lumped RLC 边界条件对话框

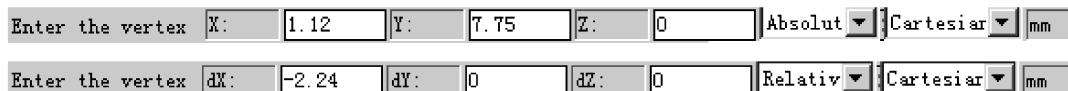


图 12-24 绘制电流方向时的状态栏

操作完成后,名为 LumpRLC1 的边界条件会自动添加到工程管理树的“Boundaries”节点下。选中它可以查看,双击它可以修改边界设置情况,如图 12-25 所示。





图 12-25 选中、查看 LumpRLC1 边界

### 12.5.3 设置辐射边界条件

为了模拟无限大辐射空间,需要对计算区域进行截断并设置辐射边界条件,方法是创建一个长方体空气腔将天线包含在其中,在其表面施以辐射边界条件。长方体尺寸选择应保证

各面距离仿真模型大于等于四分之一波长，且长方体材料为真空（vacuum）。

### 1. 创建长方体空气腔

在主菜单栏中选择“Draw→Box”命令，或者在工具栏中单击快捷按钮，命令执行后进入创建长方体模型状态。在三维模型显示窗口中任意依次点选三个坐标点创建一个任意大小的长方体，在弹出的长方体“属性”对话框中进行编辑和修改，具体操作为：在“Command”选项卡中，在“Position”项对应的“Value”栏中输入长方体的起始点坐标（-35mm，-20mm，-5mm），在“Xsize”、“Ysize”和“Zsize”项对应的“Value”栏处分别输入长方体的长、宽和高尺寸 70mm、60mm 及 15mm；在“Attribute”选项卡中，在“Name”相对应的“Value”栏中将 Box1 改为 air，在透明度“Transparent”选项对应的“Value”栏中单击按钮，调整弹出的滑动条值为 0.8，即将长方体模型透明度设置为 0.8，以方便查看内部结构。

### 2. 设置辐射边界条件

选中刚刚创建的长方体模型 air，然后在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign boundary→Radiation”命令，打开“Radiation Boundary”对话框，选取默认的所有设置，单击“OK”按钮确定，HFSS 将自动为长方体的每一个面赋予辐射边界条件，设置的辐射边界条件将自动添加到工程管理窗口中的“Boundary”节点下。可以单击 Rad1 名称来查看辐射边界。

至此，功分器的仿真模型部分就全部完成了，按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型，如图 12-26 所示。

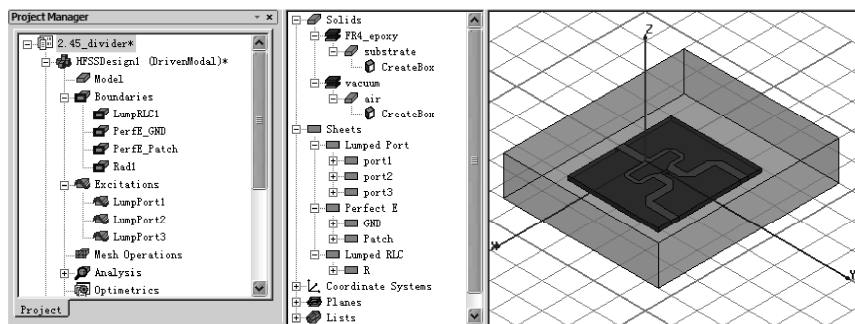


图 12-26 功分器的仿真模型


## 12.6 仿真的基本设置

### 12.6.1 求解设置

本章设计的功分器的工作中心频率为 2.45GHz，因此设置 HFSS 的求解频率为 2.45GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树的“Analysis”节点单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add



“Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开“Solution Setup（求解设置）”对话框，如图 12-27 所示。

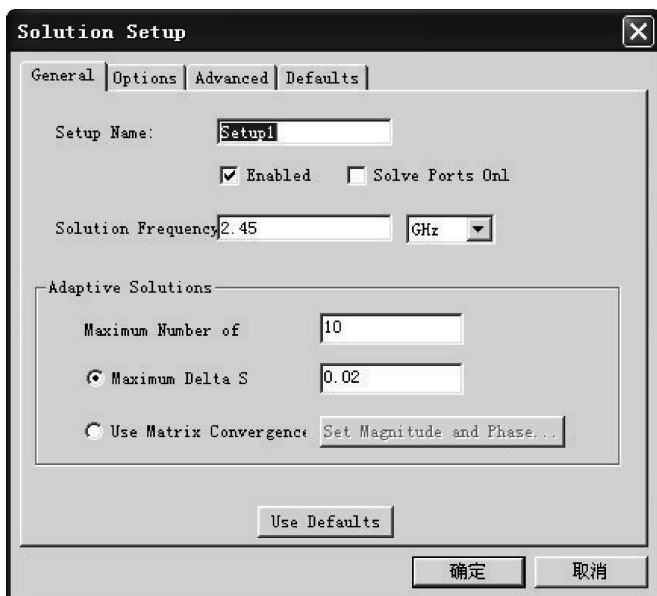



图 12-27 “Solution Setup（求解设置）”对话框

(2) 在“Solution Setup（求解设置）”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 2.45GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 10，并确认“Maximum Delta S”项为 0.02，其他选项卡的内容保持默认不变。

(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并自动添加到工程管理树的“Analysis”节点下。

## 12.6.2 扫频设置

添加一个 2~2.9GHz 的扫频设置，用以分析功分器在此频段内的传输特性。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开“Edit Sweep（扫频设置）”对话框，如图 12-28 所示。

(2) 在“Edit Sweep（扫频设置）”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择 Fast；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 2GHz，终止频率为 2.9GHz，步进长度为 0.05GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，在右侧的频率列表中便会显示扫频计算的频点。

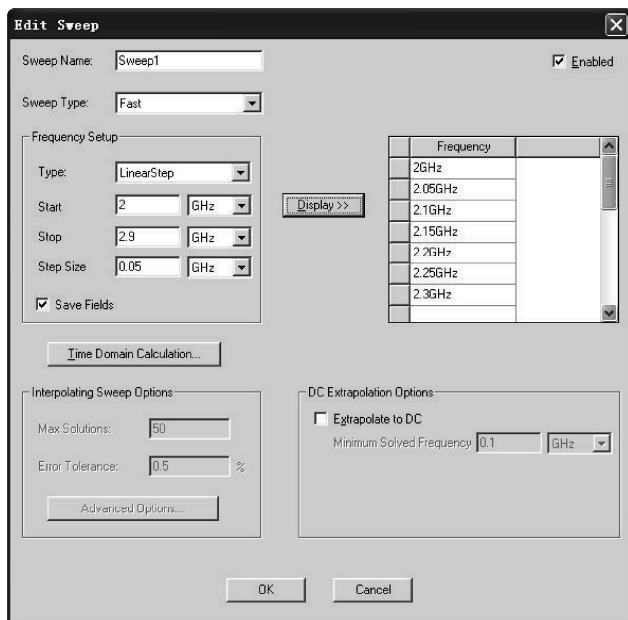





图 12-28 “扫频设置”对话框

(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下。

### 12.6.3 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了。但一般在正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口（如图 12-29 所示）。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的；如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

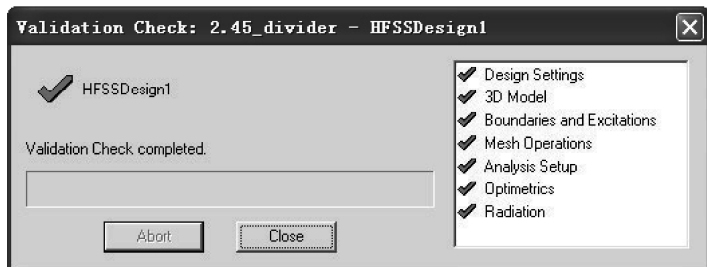



图 12-29 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树的“Analysis”节点下的求解设置项 Setup1 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 12-30 所示。

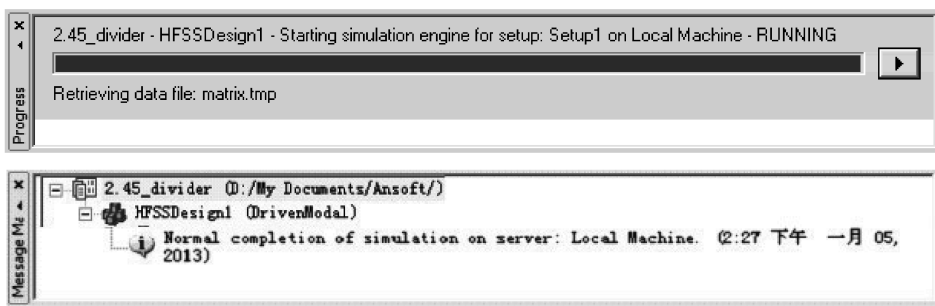


图 12-30 进程窗口和信息管理窗口

## 12.7 查看仿真分析结果

### 12.7.1 计算收敛情况

仿真分析计算完成后，在查看具体电磁特性报告之前，最好先看一下计算的收敛情况，避免不收敛结果影响仿真精度。首先在工程管理树中的“Results”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Solution Data...”命令，如图 12-31 所示，打开“Solutions”对话框，如图 12-32 左图所示，然后点选切换至“Convergence”选项卡，并在显示方式“View”项处分别点选数据列表方式（Table）和图形显示方式（Plot）。

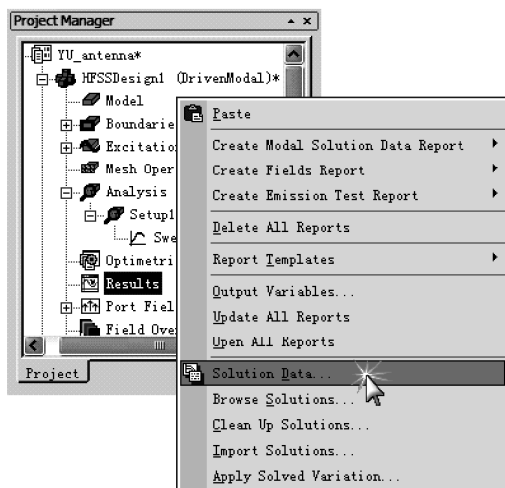


图 12-31 选择查看求解数据命令



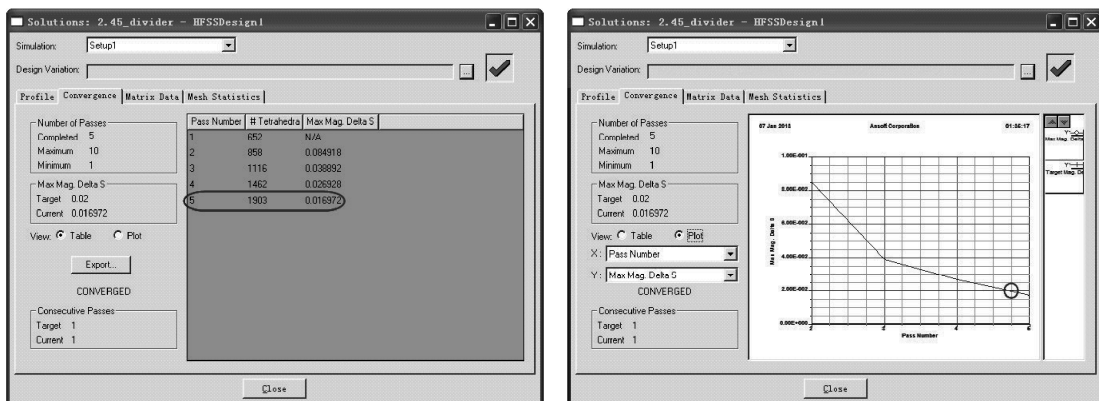


图 12-32 迭代收敛情况图表报告

由图 12-32 右图可见, 求解计算在迭代到第 5 次时达到了收敛精度, 因此仿真后处理数据是真实可信的。如果达到最大迭代次数后, 求解还没有收敛, 则需要进一步增加迭代次数, 继续进行计算, 直到收敛为止。

## 12.7.2 功分器的匹配特性

对于功分器的匹配特性, 可以通过查看各个端口的  $S$  参数来得到。输入端口匹配特性对应的为  $S_{11}$  参数。

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点, 在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令, 打开后处理报告对话框, 如图 12-33 所示。

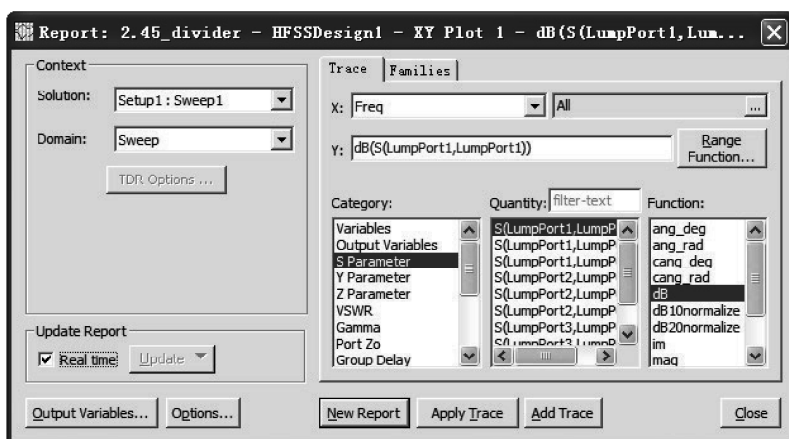


图 12-33 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1; 在“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter; 在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式 S(LumpPort1, LumpPort1);



在“Function”栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New Report”按钮生成四个端口的扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框，生成的匹配特性曲线如图 12-34 所示。

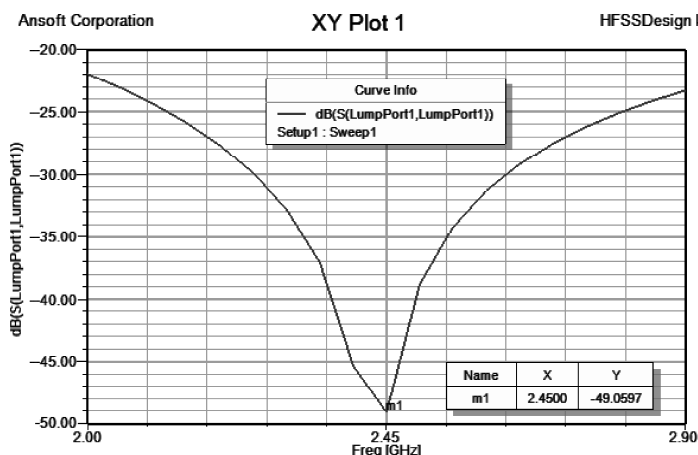


图 12-34 功分器  $S_{11}$  的匹配特性曲线

由图 12-34 可见，功分器在工作频带内的回波损耗均小于-20dB，达到工程应用指标要求。

### 12.7.3 功分器的隔离特性

对于隔离特性，主要是两输出端口之间的隔离，对应于 HFSS 软件  $S$  参数中的  $S_{32}$  或  $S_{23}$ 。

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开后处理报告对话框，如图 12-35 所示。

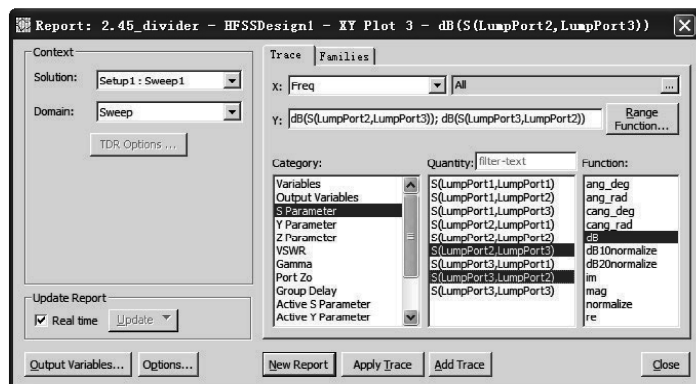


图 12-35 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1；在“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter；在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式  $S(\text{WavePort2}, \text{WavePort3})$ 、 $S(\text{WavePort3}, \text{WavePort2})$ ；在“Function”栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New

Report”按钮生成四个端口的扫频曲线，最后单击“Close”按钮关闭设置对话框，生成的隔离特性曲线如图 12-36 所示。

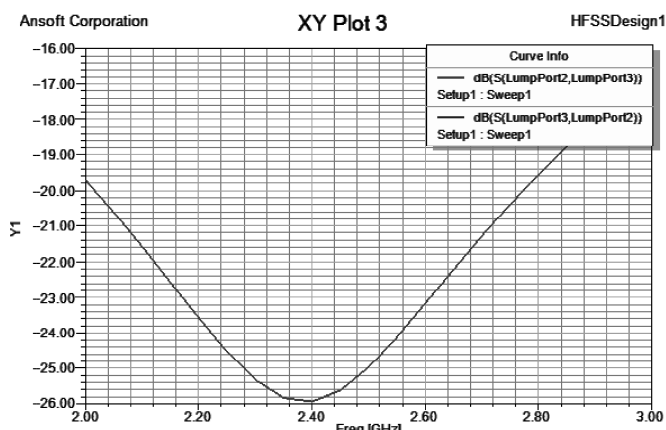


图 12-36 隔离特性曲线

由图 12-36 可见，两输出端口在 2~2.8GHz 之间的隔离度大于-20dB。

## 12.7.4 两输出端口的幅度及相位关系

### 1. 两输出端口的幅度关系

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框。在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1；在“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter；在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式 S(WavePort2, WavePort1)、S(WavePort3, WavePort1)；在“Function”栏中选择 dB，然后单击对话框底端的“New Report”按钮，生成的幅度关系曲线如图 12-37 所示。

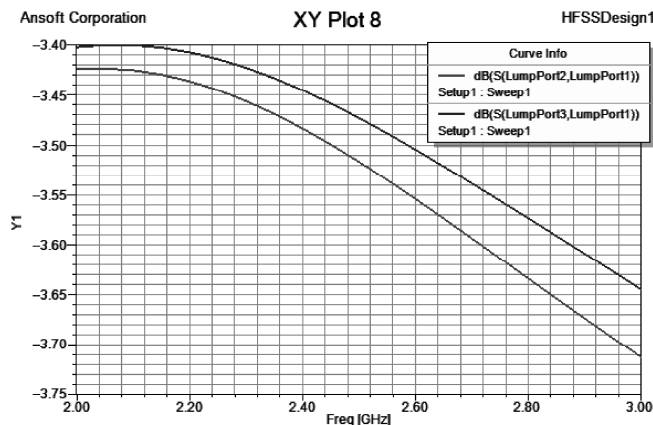


图 12-37 两输出端口幅度的关系曲线

由图 12-37 可见，两输出端口的平分特性很好，功率差小于 0.05dB。

## 2. 两输出端口的相位关系

用鼠标右键单击工程管理树中的“Results”节点，在弹出的快捷菜单中选择“Create Modal Solution Data Report → Rectangular Plot”命令，打开“Report”对话框，如图 12-38 所示。

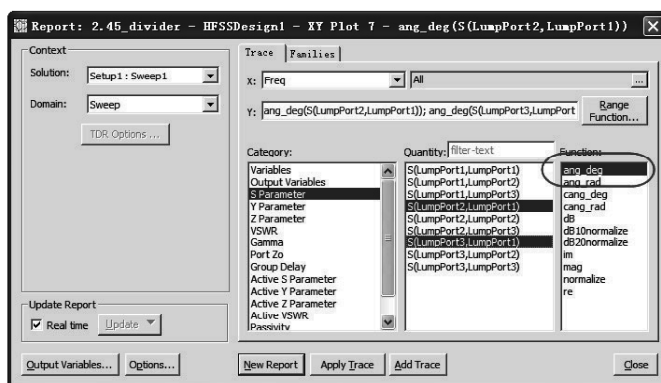


图 12-38 “Report”对话框

在“Context”栏中选择想要查看的相应扫频项 Sweep1；在“Category”栏中选择参数类型为 S Parameter；在“Quantity”栏中按住 Ctrl 键选择表达式 S(WavePort2,WavePort1)、S(WavePort3,WavePort1)；在“Function”栏中选择 ang\_deg，然后单击对话框底端的“New Report”按钮，生成的扫频曲线如图 12-39 所示。

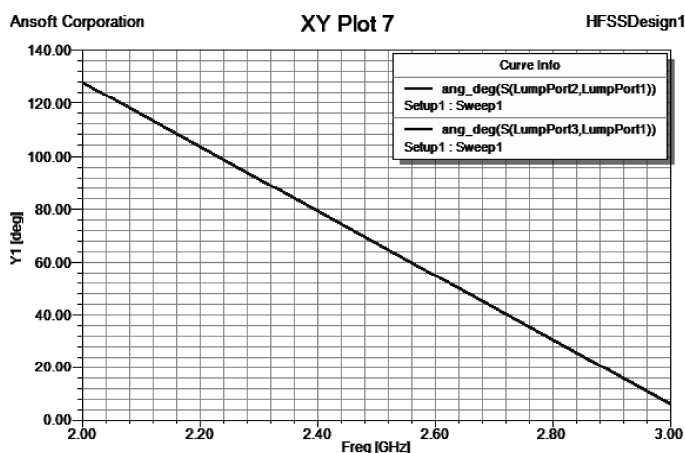


图 12-39 两输出端口的相位关系曲线

由图 12-39 可见，两输出端口的相位一致性非常好。

感兴趣的读者可以添加两个变量来代替传输线的长度和线宽，使用参数扫描分析功能查看功分器性能与传输线的长度和宽度之间的关系，以进一步优化功分器的性能指标。

# 第13章 RCS 仿真实例

## 13.1 雷达散射截面（RCS）概述

当物体被电磁波照射时，能量将朝各个方向散射，散射场与入射场之和就构成了空间的总场。从射线的观点来看，散射场包括了因介质波阻抗突变而在物体表面上产生的反射，以及由于边缘、尖顶等物体表面不连续性引起的绕射等。从感应电流的观点来看，散射场来自物体表面上感应电磁流和电磁荷的二次辐射。散射能量的空间分布称为散射方向图，它取决于物体的形状、大小和结构，以及入射波的频率、极化等。产生电磁散射的物体通常称为目标和散射体。

在进行 RCS 计算之前，我们先对 RCS 的定义及特性给予描述，这有益于对后面的内容的理解和分析。

### 13.1.1 RCS 定义

雷达散射截面（Radar Cross section, RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，它是表征目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量。它可以用来定量表征目标散射的强弱，也称为目标对入射雷达波的有效截面积，它是目标的一种假想面积，其来源是天线研究和设计的结果。接收天线通常被认为是一个“有效接收面积”的口径，该口径从通过的电磁波中截获能量，而出现在接收天线终端的接收功率则等于入射波功率密度乘以暴露在这个功率密度中的天线有效面积。同样，目标反射或散射的能量也可以表示为一个有效面积与入射雷达波功率密度的乘积，这个面积就是雷达截面，用符号  $\sigma$  来表示。

雷达截面（RCS）的定义是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念。其定义可表示为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|W_s|}{|W_i|} \quad (13-1)$$

式中， $W_s$  和  $W_i$  分别为散射功率和入射功率密度。

根据电磁场理论，功率流密度正比于电场强度  $E$  的平方（或磁场强度  $H$  的平方）。因此，RCS 也可以用入射电场和散射电场强度或入射磁场和散射磁场强度来表示，其定义为：目标在单位立体角内向接收机处散射功率密度与入射波在目标上的功率密度之比的 4 $\pi$  倍，即

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \text{ 或 } \sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (13-2)$$

式中， $E_s$  和  $W_i$  分别为散射电场和入射电场强度； $H_s$  和  $H_i$  分别为散射磁场和入射磁场强



度；因为入射波是平面波，且目标假定为点散射体，所以距离  $R$  应趋于无穷大，这就是雷达截面最基本的理论定义式。

由以上定义可以看出，RCS 的计算基本上可归结为一件事，就是要得到目标的散射场强度。如果我们能确定由于平面波入射而在目标上感应的电流，则通过辐射积分公式就可以得到目标的散射场。

### 13.1.2 RCS 的单位

RCS 是一个标量，其单位是  $\text{m}^2$ 。由于目标 RCS 随方位变化剧烈，所以通常以对数形式给出，即相对于  $1\text{m}^2$  的分贝数（又称为分贝平方米），记为  $\text{dB}_{\text{sm}}$ ，即

$$\sigma, \text{dB}_{\text{sm}} = 10 \log(\sigma, \text{m}^2) \quad (13-3)$$

- (1) 减少  $10\text{dB}_{\text{sm}}$  意味回波功率只剩下  $1/10$ 。
- (2) 减少  $20\text{dB}_{\text{sm}}$  意味回波功率只剩下  $1/100$ 。
- (3) 减少  $30\text{dB}_{\text{sm}}$  意味回波功率只剩下  $1/1000$ 。

### 13.1.3 RCS 的特性

RCS 是下列因素的函数：

- (1) 目标结构，即目标的形状、尺寸和材料的电参数（ $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  和  $\mu''$ ）；
- (2) 入射波的频率和波形；
- (3) 入射场和接收天线的极化形式；
- (4) 目标相对于入射和散射方向的姿态角。

因此， $\sigma$  通常可表示为

$$\sigma = \sigma_{ij}(\theta, \varphi) \quad (13-4)$$

式中， $i$  和  $j$  表示入射场和接收天线的极化方向，如水平极化和垂直极化；而  $(\theta, \varphi)$  表示球坐标下的视角。

在这些特性中，入射波的频率和目标有着密切的关系，同一目标对于不同的雷达频率呈现出不同的雷达截面特性。根据目标尺寸  $L$  与波长  $\lambda$  的相对关系可分为 3 种散射方式，分别为：低频方式；谐振方式；高频方式。

低频区 ( $kL \ll 1$ )：在这个区域，入射平面波沿散射体的相位变化小，因此目标上的感应电流的幅度和相位近似为常量。这时目标的外形变化并不重要，例如，小球和小的立方体基本上都是各向同性（与方向无关）的散射模式。总之， $\sigma$ 、 $\text{vs}$  和  $kL$  是平滑的并且正比于  $1/\lambda^4$ 。这个区域也叫瑞利区。

谐振区 ( $kL \approx 1$ )：对于这个区域，沿目标长度上入射场的相位变化就很显著，就像在静场情况下一样，散射体的每一部分都会影响到其他部分。散射体上每一点的场都是入射场和该物体上其余点引起的散射场的叠加，散射体各部分间相互影响的总效果决定了最终的电流密度的分布。因此，即使小尺寸的细节不那么重要，但总的几何形状也是重要的。 $\sigma$ 、 $\text{vs}$  和  $kL$  是振荡的。

高频区 ( $kL \gg 1$ )：沿着目标长度入射场的相位变化数个周期，因此，散射场与角度特别



相关。高频散射是一种局部现象，目标的总散射场可由各个独立散射中心的散射场叠加而得，这使得散射过程中细节的几何结构变得十分重要。散射电平的峰值主要和一些孤立点相关，如一个大的平板的峰值散射中心是表面的镜像点。在这个区域， $\sigma$ 、 $v_s$  和  $kL$  是平滑的并且和  $\lambda$  无关。高频区也被叫做光学区。绝大多数飞机都处于高频区，对于高频区目标的散射机理和 RCS 的研究，具有重要的实用意义。

通常，雷达发射天线和接收天线（对于单站散射而言，发射天线和接收天线是一个天线，或者当双站角很小时，也可看做“准”单站散射）离目标很远，即到目标的距离远大于目标的任何有意义的尺寸，因此入射到目标处的雷达波可认为是平面波，而目标则基本上是点散射源。如果假定该点散射体各向同性地散射能量，因为散射场依赖于目标相对于入射和散射方向的姿态，所以假想点散射体的散射强度和雷达截面都随目标的姿态角而变化，即雷达截面不是一个常数，而是与角度密切相关的一种目标特性。

当辐射源和接收机位于同一点时，如同大多数雷达工作时那样，称为单站散射（又称为后向散射或反向散射）。当散射方向不是指向辐射源时，称为双站散射，目标对辐射源和接收机方向之间的夹角称为双站角  $\gamma$ 。对于单站散射， $\gamma = 0^\circ$ 。

## 13.2 HFSS 仿真概述

HFSS 计算电磁散射的原理已经在 5.6 节做了详细介绍，这里就不再赘述。下面通过对理想导体球的散射计算实例，讲解 HFSS 仿真计算单站 RCS 和双站 RCS 的方法和操作步骤。

如图 13-1 所示，分析的球体半径为 100mm，位于坐标轴中心，材料为理想导体 Pec；用矩形空气腔将其包围，并在空气腔周围设置辐射边界条件以模拟无限大自由空间，激励采用入射平面波激励，入射方向指向 Y 轴负方向，电场极化指向 Z 轴正方向，分析并查看单站 RCS 数据，最后对仿真数据进行归一化处理，与经典理论结果进行对比。

在仿真建模的过程中，为了节约计算时间，将整个模型一分为二，在切面上引入对称边界条件以模拟整体结构的性能。金属球 RCS 仿真模型如图 13-1 所示。

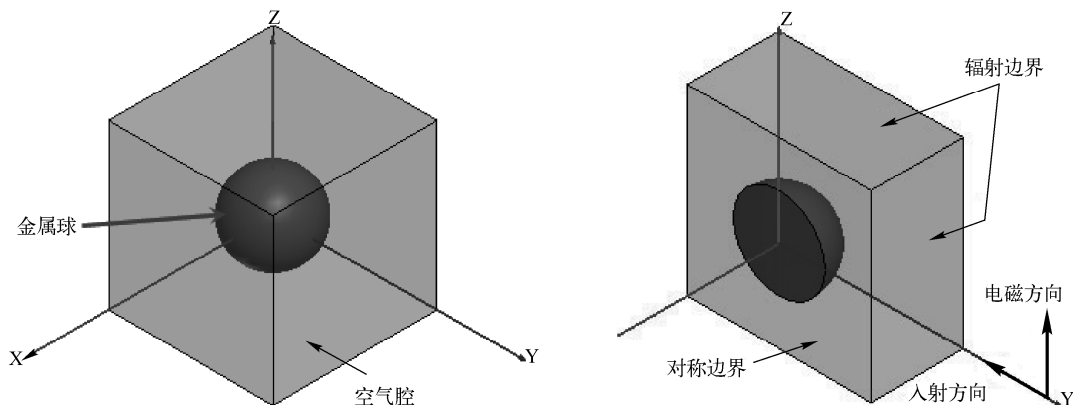


图 13-1 金属球 RCS 仿真模型

HFSS 仿真的相关设置如下。

- (1) 求解类型：模式驱动求解。
- (2) 尺寸单位：毫米（mm）。
- (3) 边界条件：理想导体条件、辐射边界条件、对称边界条件。
- (4) 激励类型：平面波入射。
- (5) 求解及扫频设置：求解频率为 2.5GHz，扫频范围为 0.05~2.5GHz。
- (6) 查看参数：单站 RCS（Monostatic RCS）。

下面介绍详细的仿真设计过程。

## 13.3 创建工程设计

### 13.3.1 新建工程设计并保存

选择计算机的“开始→所有程序→Ansoft→HFSS 11→HFSS 11”命令，或者双击桌面上的快捷方式图标启动 HFSS 软件。

当软件启动后，会自动创建一个新工程，其默认名称为 Project1。新工程 Project1 默认时会自带一个新的设计，其名称为 HFSSDesign1，并显示在工程管理窗口中。在工程管理窗口中选中 HFSSDesign1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Rename”命令，将设计名称改为 Sphere。

选择主菜单栏中的“File→Save”命令，将工程保存在指定的文件夹内，并命名为 RCS\_Sphere.HFSS，步骤如图 13-2 所示。

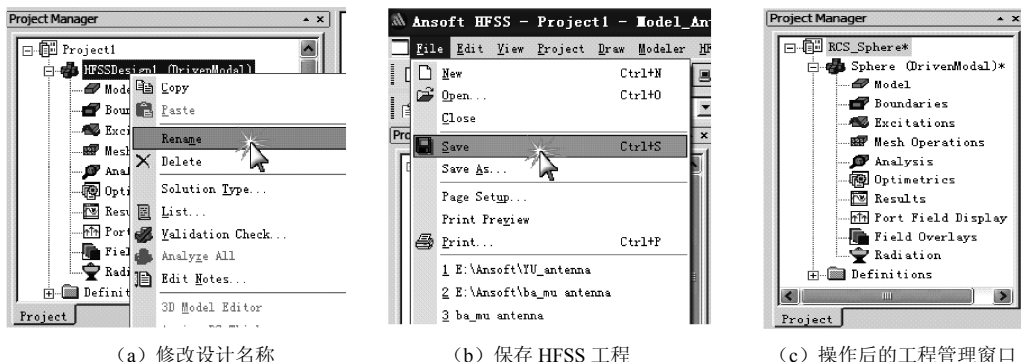


图 13-2 创建并保存新工程

### 13.3.2 设置求解类型

单击主菜单栏中的“HFSS”项，选择对应下拉菜单中的“Solution Type”命令，在弹出的“Solution Type”对话框中选择“Driven Modal”单选按钮，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 13-3 所示。



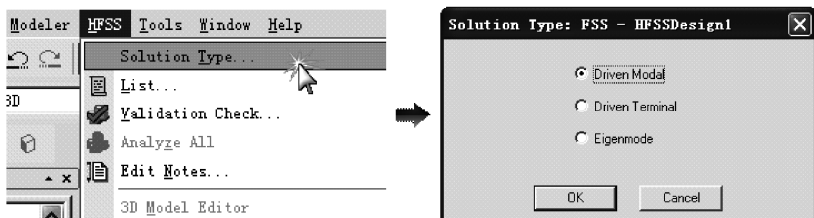


图 13-3 设置求解类型

### 13.3.3 设置模型尺寸单位

单击主菜单栏中的“Modeler”项，选择对应下拉菜单中的“Units”命令，在“Set Model Units”对话框的“Select units”下拉菜单中选择“mm（毫米）”，然后单击“OK”按钮完成操作，如图 13-4 所示。

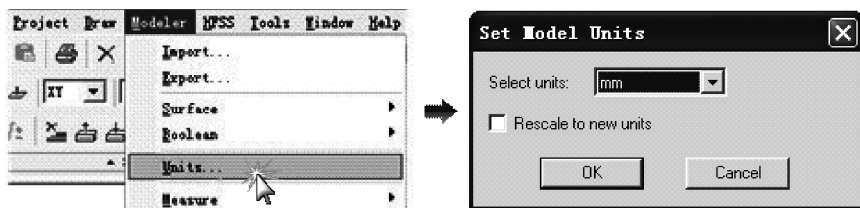


图 13-4 设置模型尺寸单位

### 13.3.4 建模的相关选项设置

在主菜单栏中选择“Tools→Options→Modeler Options...”命令，在打开的“3D Modeler Options”对话框中选择“Drawing”选项卡，勾选对话框最下面的“Edit Properties of new primitives”复选框，如图 13-5 所示。

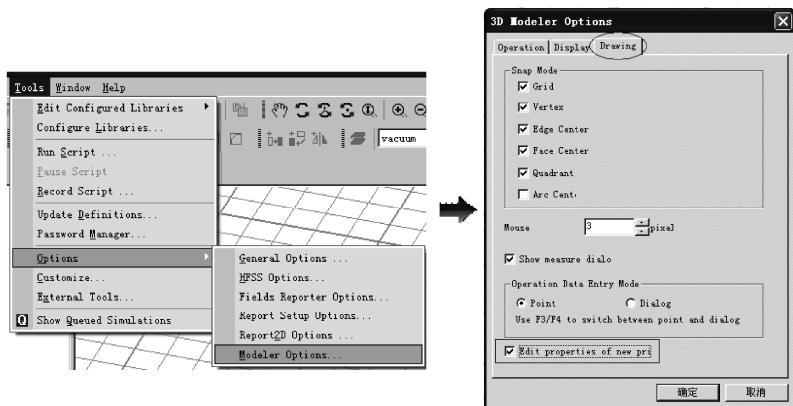


图 13-5 设置“3D Modeler Options”对话框




勾选此项目的目的是为了在进行建模操作过程中,创建完一个新的物体模型后,能够自动弹出物体模型的“属性”对话框,以便进行查看和编辑操作;如果不勾选此项,则不会自动弹出模型“属性”对话框。用户可以在工程管理窗口下方的属性窗口对模型的属性进行操作,或者双击模型管理历史树中物体模型对应的物体名称和操作命令,分别打开模型“属性”对话框中的“Command”选项卡和“Attribute”选项卡进行查看和编辑。

## 13.4 创建 RCS 的仿真模型

### 13.4.1 创建理想金属球

#### 第一步:创建半径为 100mm 的球体模型

(1) 在主菜单栏中选择“Draw→Sphere”命令,或者单击工具栏中的快捷命令按钮,进入创建球体模型状态。

(2) 此时鼠标进入捕捉状态。首先移动鼠标至坐标轴原点并单击鼠标左键确定圆球中心位置,然后移动鼠标在 xy 平面绘制出一个圆形后,在任意点单击鼠标左键确定球体半径。这样任意一个球体模型就创建完成了。操作完成后,会自动弹出模型“属性”对话框。如果没有弹出模型“属性”对话框,用户可以按照 11.4.4 节介绍的方法进行相关设置。接下来编辑、修改属性对话框中的各项,具体操作为:在“Command”选项卡中编辑圆球位置尺寸属性,将中心点“Center Position”项修改为 0mm, 0mm, 0mm, 半径“Radius”项输入 100mm;单击切换至“Attribute”选项卡,将“Name”栏中的 Sphere1 改为 Sphere,其他选项保持默认设置不变,如图 13-6 所示。

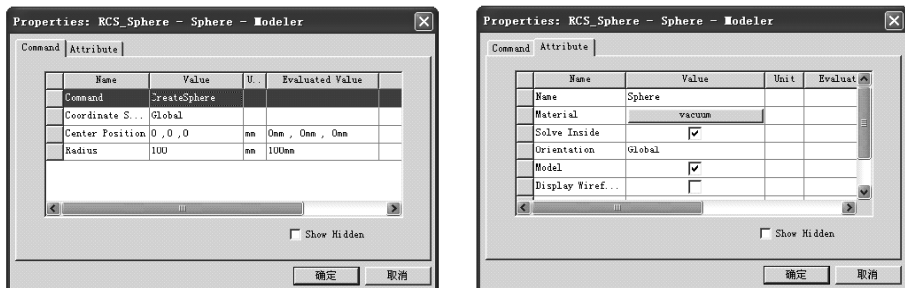


图 13-6 修改后的“Command”和“Attribute”选项卡

编辑完成后单击“确定”按钮结束,在模型操作历史树中便会添加上刚刚创建的球体模型 Sphere,然后按下 Ctrl+D 键,以适当尺寸显示模型。

#### 第二步:设置球体模型的材料属性

选中刚刚创建的球体模型,在显示窗口中单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Assign Material...”命令,打开物体模型材料的“属性”对话框,选择材料为 Pec,单击“确定”按钮完成操作。然后按下 Ctrl+D 键,以适当尺寸显示模型,最后得到的模型如图 13-7 所示。

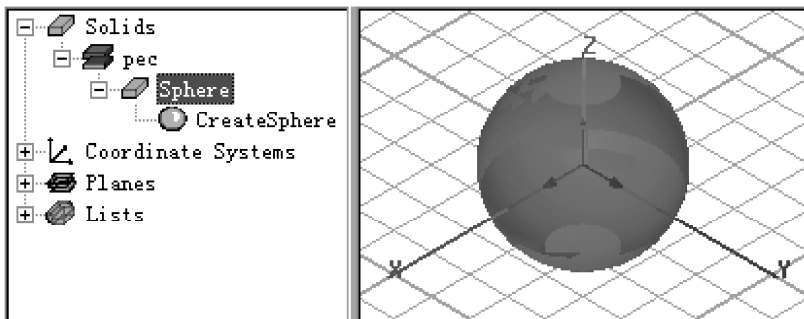



图 13-7 创建的理想金属球模型

### 13.4.2 创建辐射空气腔

首先选择绘制长方体命令“Draw→Box”，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，进入长方体模型创建状态。然后在模型显示窗口中三次单击鼠标左键，选择三个坐标点创建一个任意大小的长方体模型，如图 13-8 所示。在弹出的“属性”对话框中对相应选项卡的内容进行修改和编辑，具体操作为：“Command”选项卡的“Position”项设为-200mm，-200mm，-200mm；“XSize”、“YSize”和“ZSize”项分别输入 400mm、40mm 和 400mm；“Attribute”选项卡中的“Name”项修改为 air，再单击“Transparent”项的“Value”列，弹出透明度调节器，拖动滑块至 0.6，即指定空气腔透明度为 0.6，以便于观察内部模型，其他选项保持默认设置，单击“确定”按钮完成，修改后的“属性”对话框如图 13-9 所示。

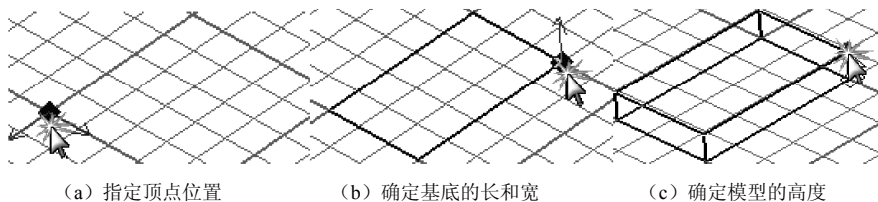


图 13-8 创建任意大小的长方体模型

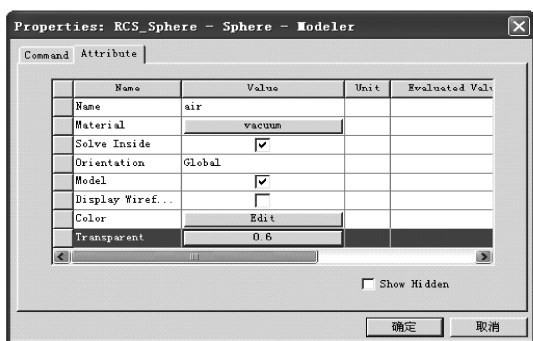
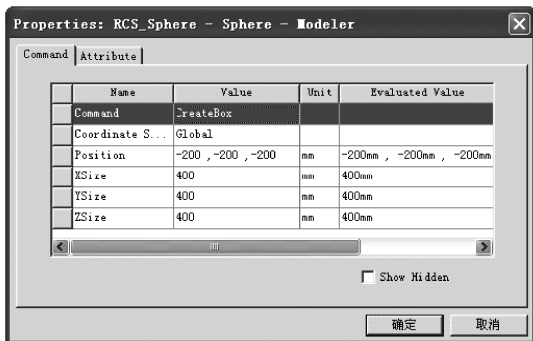


图 13-9 长方体模型的“属性”对话框

创建完空气腔的仿真模型如图 13-10 所示。

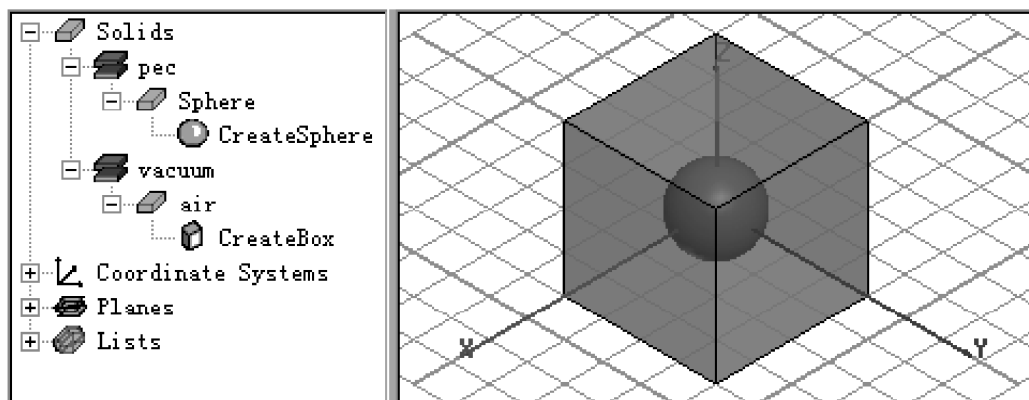


图 13-10 创建完空气腔的仿真模型

## 13.5 设置激励及边界条件

### 13.5.1 设置平面波激励

在主菜单栏中选择“HFSS→Excitations→Assign→Incident Wave→Plane Wave”命令，或者在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign Excitation→Incident Wave→Plane Wave”命令，打开如图 13-11 所示的入射波设置对话框。

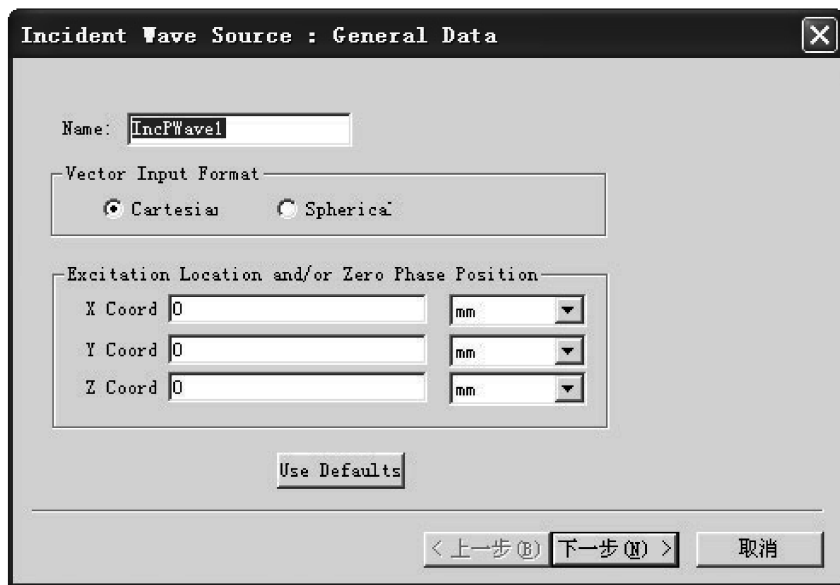


图 13-11 入射波设置对话框

首先在“General Data”标签页中，输入激励名称为 IncPWave，其他选项保持默认设置，再单击“下一步”按钮，进入“Cartesian Vector Setup”标签页，在其中的“E0 Vector”栏中指定入射波电场矢量方向为 Z 轴正方向，对应的“X”、“Y”和“Z”项分别输入 0、0 和 1；在“k Vector”栏中指定入射波入射方向为 Y 轴的负方向，对应的“X”、“Y”和“Z”项分别输入 0、-1 和 0。设置完成后单击“下一步”按钮，进入“Plane Wave Options”标签页，保持默认设置不变，单击“完成”按钮结束操作。至此就添加了一个电场矢量平行于 Z 轴，并沿 Y 轴负方向入射的平面波，并会被自动添加到工程管理树的“Excitations”节点下。用户可以单击对应的激励名称进行查看，或者双击相应的激励名称打开入射波“属性”对话框进行编辑和修改，如图 13-12 所示。

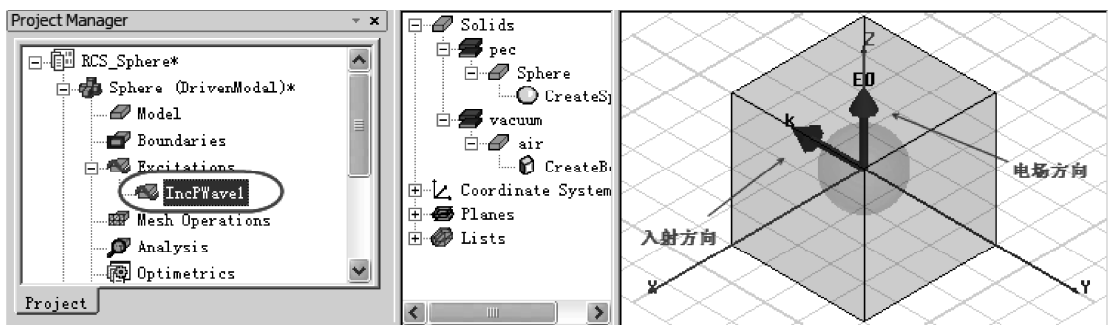


图 13-12 选中查看入射波属性

### 13.5.2 设置辐射边界条件

首先在模型显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Select Faces”命令，进入平面选择模式，用鼠标依次选择长方体空气腔的上下左右六个面；然后在六个面被选中的情况下，执行“HFSS→Boundaries→Assign→Radiation”命令，或者在显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Assign boundary→Radiation”命令，打开“Radiation Boundary”对话框，选取默认的所有设置，单击“OK”按钮确定，HFSS 将自动为长方体的每一个面赋予辐射边界条件，以模拟无限大自由空间。设置的辐射边界条件将自动添加到工程管理窗口中的“Boundaries”节点下，可以通过单击 Rad1 名称来查看辐射边界，如图 13-13 所示。

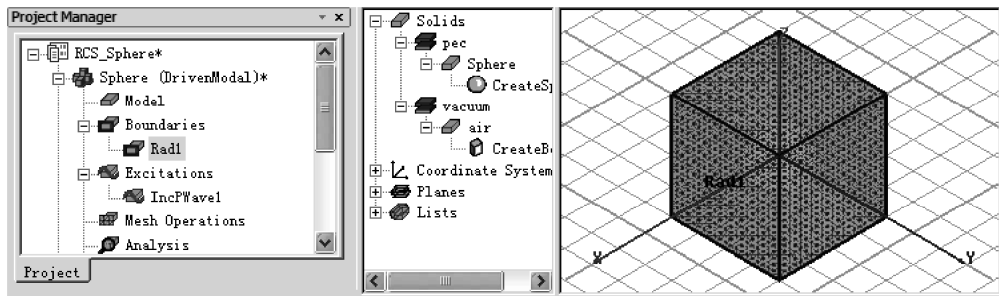



图 13-13 查看辐射边界条件

### 13.5.3 设置对称边界条件

#### 第一步，用分裂操作将仿真模型分开

首先在模型显示窗口中的任意非模型区域单击鼠标左键来激活显示窗口，并选择右键菜单中的“Select Objects”命令，回到物体模型选择模式；然后执行“Edit→Select All”命令，或者利用快捷按钮 **Ctrl+A** 键来选中所有物体模型；接下来执行“Modeler→Boolean→Split”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，弹出如图 13-14 所示的“Split”对话框。

在“Split”对话框中指定“Split Plane”项为 YZ；在“Keep fragments”项中选择“Negative side”复选框，其他选项不变，单击“OK”按钮完成操作。操作完成后的模型如图 13-15 所示。

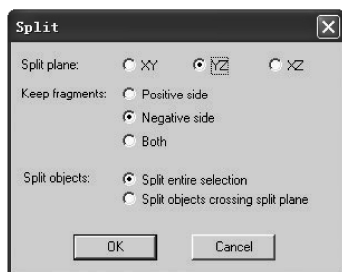


图 13-14 “Split”对话框

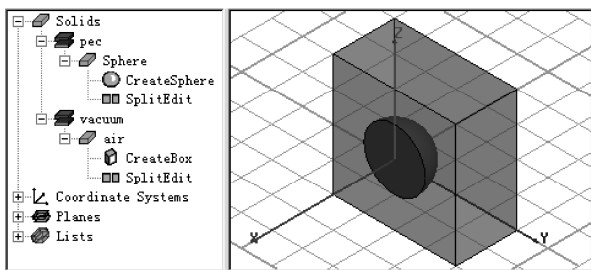


图 13-15 Split 操作后的模型

#### 第二步，设置对称边界条件

在模型显示窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Select Faces”命令，进入平面选择模式，选中分裂操作后的对称平面，即模型的 YoZ 平面，然后打开鼠标右键菜单，执行“Assign Boundary→Symmetry...”命令，弹出“Symmetry Boundary”对话框。由于对称面平行于入射波电场方向，所以根据 4.1.8 节介绍的设置原则，点选“Symmetry”栏中的 Perfect H 项，且默认边界名称为 Sym1，最后单击“OK”按钮完成操作，如图 13-16 所示，即给 YoZ 平面施加了对称边界条件。这样边界条件 Sym1 会自动添加到工程管理树的“Boundaries”节点下，单击查看，如图 13-17 所示。

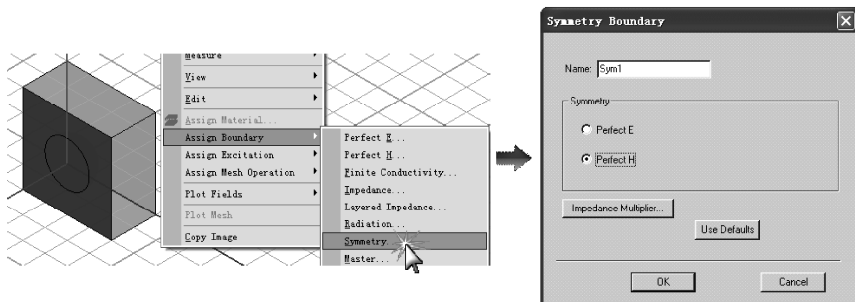


图 13-16 设置对称边界条件

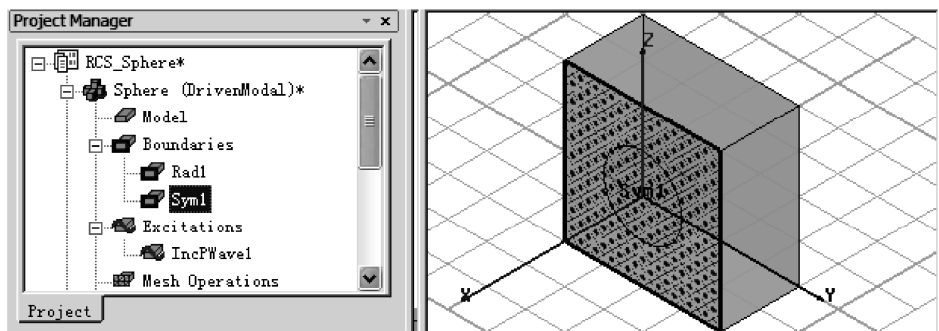



图 13-17 选择查看对称边界

至此，理想金属圆球 RCS 的仿真模型部分就全部完成了。按下 Ctrl+D 键，以适当比例显示模型。

## 13.6 仿真的基本设置

### 13.6.1 求解设置

设置 HFSS 的自适应求解频率为 2.5GHz。具体操作步骤如下。

(1) 在工程管理树中的“Analysis”节点处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Solution Setup”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，打开如图 13-18 所示的“Solution Setup（求解设置）”对话框。

(2) 在“Solution Setup（求解设置）”对话框的“General”选项卡下，“Setup Name”项保持默认名称 Setup1；求解频率“Solution Frequency”项输入 2.5GHz；最大求解迭代次数“Maximum Number of Passes”项设置为 6，并确认“Maximum Delta Energy”项为 0.1，其他选项卡的内容保持默认不变。

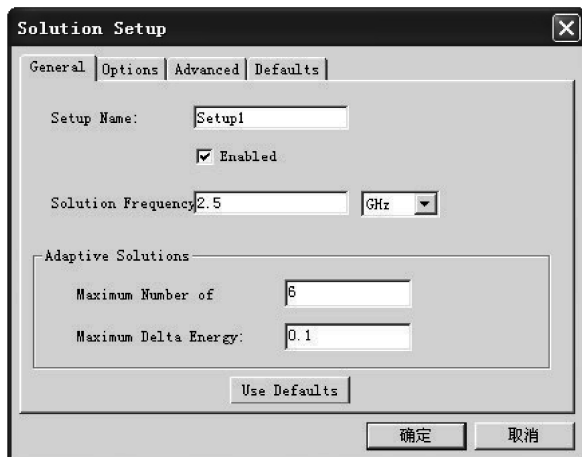



图 13-18 “Solution Setup（求解设置）”对话框



(3) 单击“确定”按钮完成操作，此时便设置了一个名为 Setup1 的求解设置，并被自动添加到工程管理树的“Analysis”节点下。

### 13.6.2 扫频设置

添加一个 0.05~2.5GHz 的扫频设置，用以分析金属球在此频段内的 RCS 特性。

(1) 单击工程管理树中的“Analysis”节点前的加号将其展开，选中其中的求解设置项 Setup1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Add Frequency Sweep”命令，或者在工具栏中单击快捷命令按钮，在弹出的对话框中单击“OK”按钮，打开如图 13-19 所示的“Edit Sweep（扫频设置）”对话框。

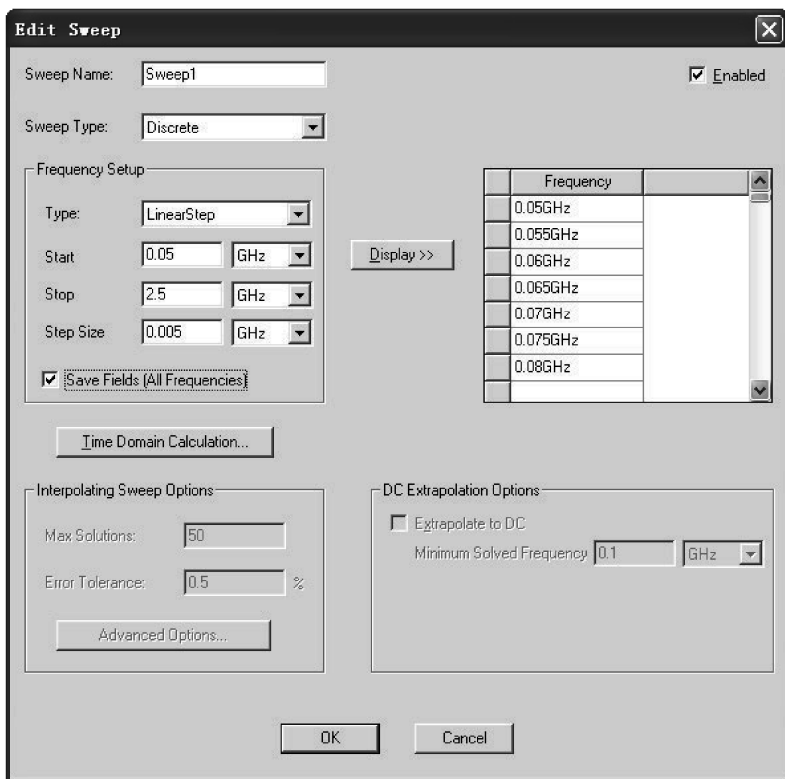


图 13-19 “Edit Sweep（扫频设置）”对话框

(2) 在“Edit Sweep（扫频设置）”对话框中，默认扫频设置名称为 Sweep1；在扫频类型“Sweep Type”项中选择 Discrete；在频率设置“Frequency Setup”栏中指定频率变化方式为线性步进 LinearStep，起始频率为 0.05GHz，终止频率为 2.5GHz，步进长度为 0.005GHz，输入完成后，单击对话框中部的“Display>>”按钮，在右侧的频率列表中便会显示扫频计算的频点。




(3) 单击“OK”按钮完成操作，此时名为 Sweep1 的扫频设置会自动添加到工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置“Setup1”节点下。





### 13.6.3 仿真有效性验证及分析计算

前面完成了与仿真相关的所有建模和设置操作，接下来就可以进行分析求解了。但一般在进行正式分析计算之前还要对设计进行有效性验证，以检查设计的完整性和有效性，找出存在问题的地方，提示使用者进行相应的修改。

选择主菜单栏中的“HFSS→Validation Check”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，此时 HFSS 便会自动执行设计有效性验证，并会弹出仿真有效性验证结果报告窗口，如图 13-20 所示。当该窗口中验证的各项前都显示为图标时，说明当前的 HFSS 设计是完整、正确和有效的；如果有哪项前不是图标，则需要有针对性地进行修改，直到全部项目都通过验证，再单击“Close”按钮关闭该窗口。

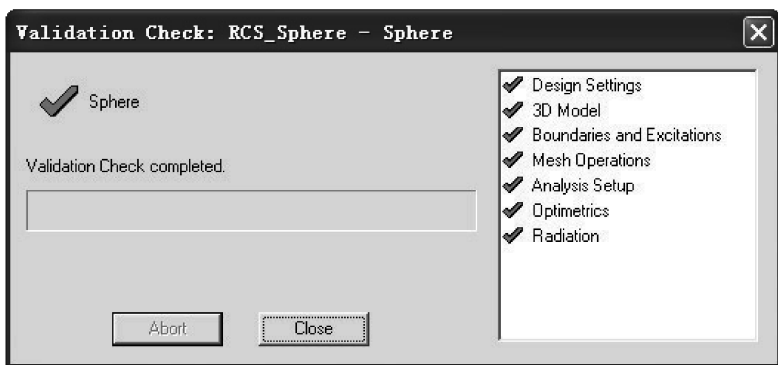



图 13-20 仿真有效性验证结果报告窗口

接下来就可以进行分析计算了。在工程管理树中的“Analysis”节点下的求解设置项 Setup1 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Analysis All”命令，或者单击工具栏中的快捷命令按钮，运行仿真计算。在仿真分析的进行过程中，HFSS 工作界面下部的进程窗口会显示分析进度条，信息管理窗口会显示与求解相关的信息及结束信息，如图 13-21 所示。

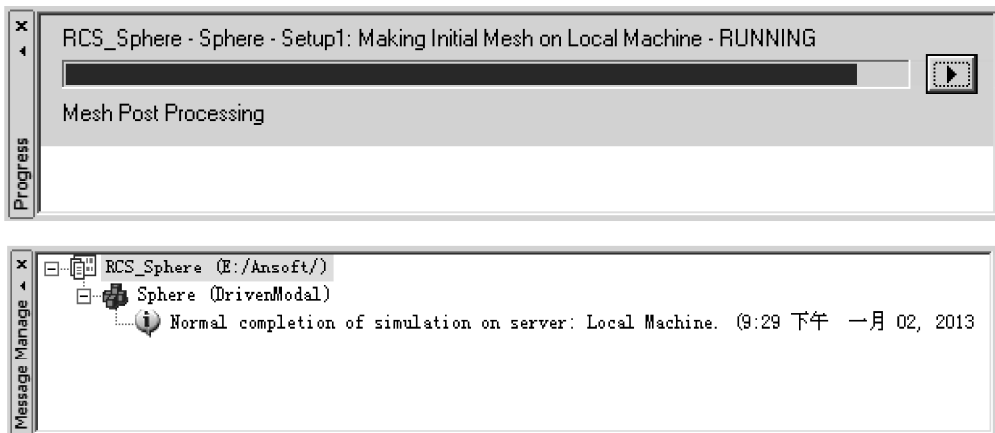


图 13-21 进程窗口和信息管理窗口



## 13.7 查看仿真分析结果

### 13.7.1 理想金属球的单站 RCS

#### 1. 定义远场辐射球面

(1) 单击“HFSS→Radiation→Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令，弹出“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框，或者在工程管理树中点选“Radiation”节点，打开右键快捷菜单，选择其中的“Insert Far Field Setup→Infinite Sphere...”命令来打开该对话框，如图 13-22 所示。

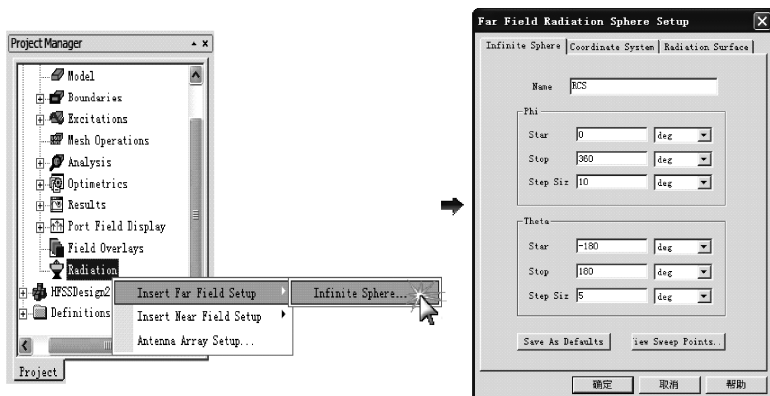


图 13-22 打开“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框

(2) 在“Far Field Radiation Sphere Setup（远场辐射球面设置）”对话框的“ Infinite Sphere”选项卡中，在“Name”文本框中输入新建辐射球面的名称 RCS，以便绘制远场三维方向图时选择该远场辐射球面。

(3) 指定辐射球面计算的角度范围：角度 Phi 的起始角度为 0deg，终止角度为 360deg，角度步长为 10deg；角度 Theta 的起始角度为 -180deg，终止角度为 180deg，角度步长为 5deg。

(4) 其他选项卡的内容保持默认设置，单击“确定”按钮完成操作，定义的远程辐射球面 RCS 会自动添加到工程管理树中的“Radiation”节点下。

#### 2. 绘制金属球的单站 RCS 扫频曲线

在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→Rectangular Plot”命令，打开如图 13-23 所示的“Report”对话框。首先在“Context”栏中的“Solution”项选择 Setup1: Sweep1，并确保“Geometry”项选择的是 RCS；然后在“Category”栏中选择参数类型为 Monostatic RCS（单站 RCS），在“Quantity”栏中选择 Monostatic RCSTotal，“Function”栏中选择<none>，此时在纵坐标 Y 项显示的表达式为 MonostaticRCSTotal，再将鼠标移到该表达式末端空白处单击鼠标左键，当出现光标时，将表达式编辑为  $\text{MonostaticRCSTotal}/(\pi \cdot 0.1^2)$ ，即将 RCS 以半径的平方乘上  $\pi$  进行归一化处理，横坐标 X 项指定为频率 Freq，范围为 All；单击切换到“Families”

选项卡, 指定 Phi 和 Theta 都为  $90^\circ$  (在前面的第 5.6.5 节中已经讲过查看单站 RCS 时, 并不需要指定观察角度, 此处指定 Phi 和 Theta 是为了避免软件对无关角度的重复多次计算, 也可不管该项, 结果是在不同的角度结果都是一样的), 然后单击“New Report”按钮生成金属球在不同频率时的单站 RCS 曲线, 最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。

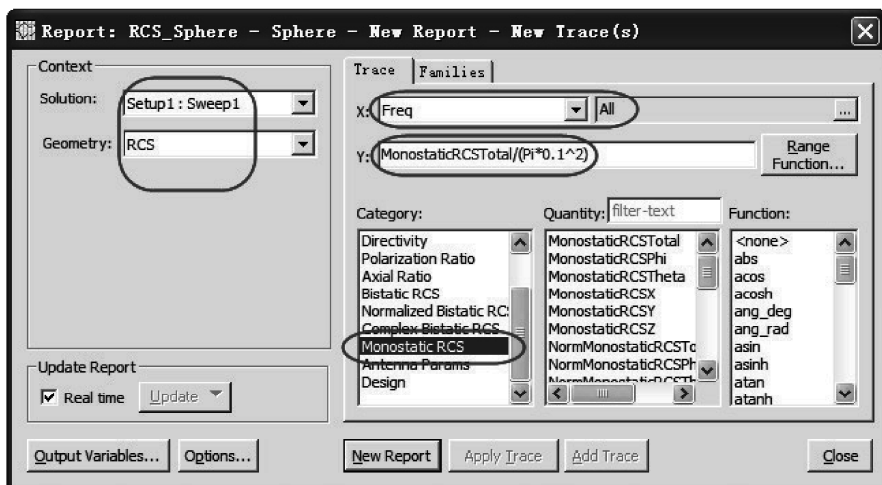


图 13-23 “Report”对话框

绘制的归一化单站 RCS 曲线如图 13-24 所示。

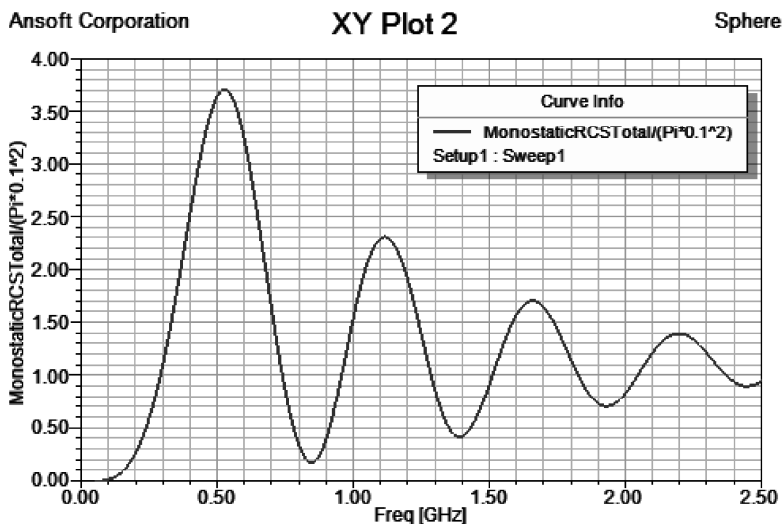


图 13-24 金属球的归一化单站 RCS 曲线

从图 13-24 中可以看出由于完美的径向对称性, 使得理想金属球是所有三维结构中最简单的散射体。然而, 尽管其几何外形简单且回波不随取向变化, 但它的 RCS 随电尺寸明显变化。金属球散射的精确解为熟知的 Mie 级数。



### 13.7.2 理想金属球的双站 RCS

为了进一步了解 HFSS 中关于 RCS 的操作,下面查看一下仿真的金属球在 2.5GHz 单频点时,在不同观察角度时的 RCS 曲线,具体为  $\Phi$  为  $70^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $90^\circ$  时,沿  $\Theta$  方向的扫描曲线。操作如下所示。

(1) 在工程管理树中的“Results”节点上单击鼠标右键,在弹出的快捷菜单中选择“Create Far Fields Report→Rectangular Plot”命令,打开“Report”对话框。

(2) 在“Context”栏中的“Solution”项选择 Setup1: LastAdaptive,并确保“Geometry”项选择的是 RCS;然后在“Category”栏中选择参数类型为 Bistatic RCS(双 RCS),在“Quantity”栏中选择 Monostatic RCTotal,在“Function”栏中选择<none>,此时在纵坐标 Y 项显示的表达式为 RCTotal。“Function”栏中选择<none>是为了确保横坐标 X 项为 Theta。

(3) 单击切换到“Families”选项卡,取消对  $\Phi$  的“Use All Value”的勾选;按住 Ctrl 键选择  $\Phi$  的角度为  $70^\circ$ 、 $80^\circ$  和  $90^\circ$ ,然后单击“New Report”按钮生成金属球在频率 2.5GHz 时,在不同观察角度的双站 RCS 曲线,最后单击“Close”按钮关闭设置对话框。绘制的金属球双站 RCS 曲线如图 13-25 所示。

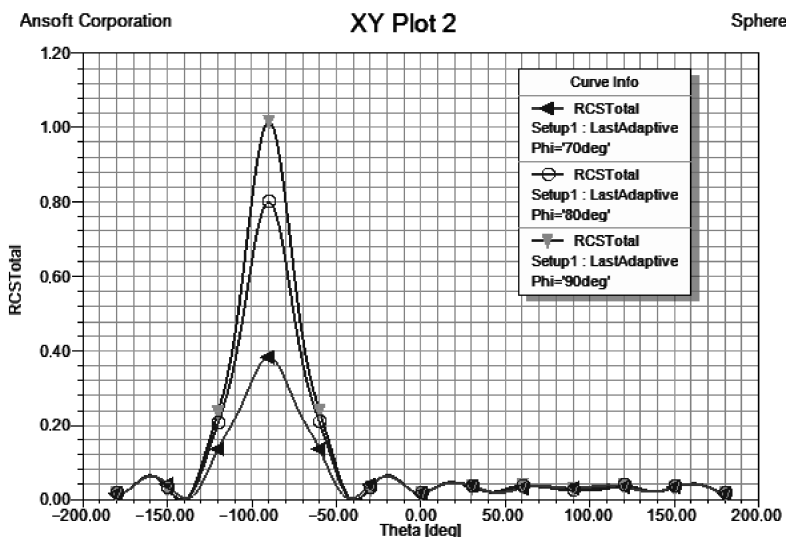


图 13-25 金属球的双站 RCS 曲线

以上完成了对理想金属球的建模和分析,查看了其单站和双站 RCS 曲线。本章只是通过一个简单的模型仿真来介绍 HFSS 在分析目标 RCS 中的基本思路和操作步骤,读者可以根据自身需要构建所需模型,再按照以上步骤进行相应的 RCS 仿真分析。

## 附录 A HFSS 的常用快捷键

F1	帮助文件
Alt + Shift + 拖动鼠标	动态缩放
Alt + 双击左键	将视图角度调整为沿某坐标轴显示
Alt + 拖动鼠标	旋转模型
B	选中被遮挡的物体
Ctrl + A	选择所有可见对象
Ctrl + C	复制
Ctrl + D	适合视图
Ctrl + F	缩小, 屏幕中心
Ctrl + N	新建项目
Ctrl + O	打开
Ctrl + P	打印
Ctrl + Shift + A	取消所有对象
Ctrl + V	粘贴
Ctrl + X	剪切
Ctrl + Y	重做
Ctrl + Z	撤销
Ctrl + Alt	旋转
Ctrl + 0	层叠窗口
Ctrl + 1	平铺窗口
Ctrl + 2	平铺窗口垂直
Ctrl + D	以最合适的尺寸显示模型
Ctrl + Enter	设置本地参考点
E	选择模型的棱边。
F	选择模型面
F1 + Shift	上、下文帮助
F4 + Ctrl	关闭程序
F6	线框显示模型
F7	平滑阴影显示
M	可以同时选择模型、面、边和顶点
O	选择模型体
Shift + 拖动鼠标	平移
V	选择模型的顶点

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036